

FORMACION DE GRANDES MESETAS ROCOSAS

EVOLUCION EN BLOQUE DE LAS PROTEINAS

SIMULACION DE LAS LESIONES CEREBRALES

Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN

LA PRUEBA EN MATEMATICAS

DICIEMBRE 1993
700 PTAS.



Diciembre de 1993 Número 207



SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Luis Guillermo Corretgé Castañón: *Grandes provincias ígneas*; Esteban Santiago: *Módulos móviles en la evolución de las proteínas*; Armando García Rodríguez: *Fluidos electrorreológicos*; Mercè Bernal Cid: *Plantas de polinización acuática*; José Manuel García de la Mora: *La recuperación del* Vasa; Luis Bou: *La muerte de la demostración* y *Juegos matemáticos;* J. Vilardell: *Hace...* y *Taller y laboratorio*

Ciencia y empresa:

Manuel Puigcerver

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Diseño de la portada realizado por el Centro de Geometría de la Universidad de Minnesota

Página	Fuente
7-13	María Isabel Vicente Maroto
14-15	Ian Worpole
16	Programa de Perforación Oceánica (*izquierda*) y Patricia J. Wynne (*derecha*)
17	Patricia J. Wynne (*izquierda*), Servicio Geológico Australiano (*arriba, a la derecha*) y Millard F. Coffin (*abajo, a la derecha*)
18-20	Ian Worpole
21	Roger Ressmeyer / Starlight
22-23	Visual Logic
24-28	Jared Schneidman Design
38	Jared Schneidman Design
39	Thomas C. Halsey
40-42	Jared Schneidman Design
43	Thomas C. Halsey
44	© 1993 Universal Studios / Amblin Productions; cortesía de Industrial Light and Magic
46-49	Patricia J. Wynne
50-51	Paul Alan Cox (*fotografías*) y Patricia J. Wynne (*dibujos*)
52	Paul Alan Cox
54-55	Cortesía de Tim Shallice
56	Johnny Johnson (arriba) y Boris Starosta (*abajo*)
57-60	Boris Starosta
62-63	Cortesía del Museo Vasa de Estocolmo
64-65	Jana Brenning (*arriba*) y Museo Vasa (*abajo*)
66	Hank Iken
67-69	Cortesía de Hans Hammarskiold, Museo Vasa
70-71	Centro de Geometría (*composición por computador*) Stephanie Rausser (*fotografía*)
72	Robert Prochnow
73	Per Breiehagen / Black Star (*fotografía*); Jean E. Taylor, Universidad de Rutgers (*composición por ordenador*)
74	James T. Hoffman, Edward C. Thayer, G.A.N.G., departamento de matemáticas de la Universidad de Massachusetts en Amherst (*composición por ordenador*); Jessica Boyatt (*fotografía*)
75	David Ben-Zvi, Centro de Geometría (*composición por ordenador*); Robert Prochnow (*fotografía*)
76	Johnny Johnson
82	Michael Goodman
83	Jason Küffer
84-87	Documentos *Pour la Science*



LA PORTADA muestra un fotograma de una película generada por ordenador, en la que una esfera se está extrovertiendo: volviéndose del revés como un guante. La "videodemostración" se realizó en el Centro de Geometría de Minneápolis y se basa en un teorema topológico de William P. Thurston, del Instituto de Investigación Matemática (véase "La muerte de la demostración", por John Horgan, en este número). Los axiomas de la topología permiten que la piel de la esfera sea estirada y retorcida, e incluso que pase a través de sí misma.

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
Juan Pedro Campos
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
M.ª Cruz Iglesias Capón
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Alan Hall, *Executive Editor*; Michelle Press, *Managing Editor*; John Rennie, Russell Ruthen, *Associate Editors*; Timothy M. Beardsley; W. Wayt Gibbs; John Horgan; Marguerite Holloway; *Senior Writer*; Philip Morrison, *Book Editor*; Corey S. Powell; Philip E. Ross; Ricki L. Rusting; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam.
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley
CHAIRMAN OF THE BOARD Dr. Pierre Gerckens
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	7.700	14.000
Extranjero	8.400	15.400

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 700 pesetas
Extraordinario: 900 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

— En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

— El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

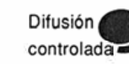
para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 - 76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Avda. Carrilet, 237 - 08907 l'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotographik, S.A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Hace...

...cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: «La penicilina, el mágico fármaco que se extrae del moho *Penicillium notatum*, podría ser el mayor descubrimiento médico de nuestra época, pero está aún por ver que en verdad lo sea. Nadie puede afirmar con seguridad qué tipos de infección cederán o no al tratamiento. Tampoco se sabe con certeza si, tal como parece, la penicilina está del todo exenta de reacciones peligrosas. Para aclarar la situación se precisa en cantidades suficientes que permitan avanzar la investigación. Sin embargo, la apremiante carencia en la producción de la droga parece dejar indiferente al moho, pues éste sólo genera dosis infinitesimales.»

«Una nueva arma antisabotaje, en forma de aparato de rayos X electrónicamente accionado, permite realizar sin peligro y de manera instantánea el examen interno fluoroscópico y radiográfico, no destructivo, de la paquetería y pequeño equipaje entrante y saliente en fábricas de material de guerra, estafetas aéreas y ferroviarias, oficinas de correos, comisarías de policía, etc. Para utilizar el aparato, que fabrica North American Philips Company, Inc., basta con enchufarlo a una toma estándar de 110 volts de c. a., abrir la tapa, introducir el objeto a examinar, cerrar la tapa, pulsar un botón y observar el interior a través de un ocular situado a la altura del ojo.»

«A menos que se descubran nuevos campos petrolíferos, los Estados Unidos pueden verse obligados a importar crudos del extranjero y también a emplear más carbón de baja calidad.» —*E. G. Bailey, vicepresidente de Babcock and Wilcox Company.*

«La posibilidad de que los automovilistas americanos circulen por carreteras de acero a poco de que acabe la guerra se perfila como resultado de la instalación experimental de una calzada de ese material en una carretera de Connecticut. Los patrocinadores del proyecto (la ciudad de Darien y la Irving Subway Grating Company) opinan que si éste se muestra exitoso, podría servir de modelo para una red de carreteras secundarias hechas de acero que se extendería por las Américas del Norte y del Sur. La técnica requiere trabar unos con otros paneles reticulares, todos de 0,60 por 3,80 metros; rellenar el mallado con arena de construcción común; y luego recubrir con una capa de petróleo para firmes.»

...cien años

SCIENTIFIC AMERICAN: «Realmente sorprende lo que tiene que decir Sir R. Ball acerca del movimiento de las moléculas en el diamante. Los cuerpos se componen de moléculas pequeñísimas, pero no infinitamente pequeñas. Si la sensibilidad de nuestros ojos aumentara hasta que fuesen dos o tres millones de veces más potentes, se vería que los átomos del diamante se encuentran todos en un estado de movimiento rápido de la más compleja naturaleza. Veríamos a cada molécula oscilando con la mayor violencia entre las moléculas vecinas y estremeciéndose bajo las sacudidas provocadas por sus encontronazos con otras moléculas.»

«La fotografía ha permitido a los astrónomos de hoy contemplar lo que sus colegas de pocos años atrás jamás soñaron. En una conferencia recientemente celebrada en San Francisco se proyectaron unas sesenta vistas estereoópticas. En las imágenes de Marte, el ojo experto del astrónomo detecta unas pequeñas manchas verdes, que se cree son de agua, y otras que se supone son de tierra. En los polos aparecen manchas blancas, evidentemente hielo y nieve. La reproducción del gran cometa de 1882 causaba una impresión extraordinaria. Este cometa posee una cola de 160 millones de kilómetros de largo, y no volverá a ser visible hasta dentro de 800 años.»

«A primeras horas de la noche del 4 de diciembre murió el profesor John Tyndall. Asociado con Faraday en sus trabajos de la Regia Institución Londinense, fue designado para el sillón de Filosofía Natural en 1853 y nombrado sucesor de Faraday, en el cargo de superintendente, a la muerte de éste en 1867. Su esposa fue la causante inocente de su muerte. Enfermo hacía algún tiempo, tomaba cloral y sulfato de magnesia. Por error su esposa le suministró una gran dosis de cloral pensando que era la magnesia. Al darse cuenta de lo que había hecho, se lo dijo a él. Este, exclamando 'Has matado a tu John', saltó de la cama y pidió un extractor estomacal. Pero no fue posible salvar su vida. Tomó la dosis fatal a las 8:30 de la mañana, y la muerte le sobrevino diez horas más tarde.»

«Los ayuntamientos suelen retirar la basura mediante carros que van de casa en casa recogiendo los desperdicios que hallan a su paso. Los carros, una vez llenos, atraviesan las calles con su maloliente y patógena carga camino de un lejano vertedero. Insatisfecho con este sistema, el superintendente Welles, del departamento de limpieza de la ciudad de Chicago, ha ideado un crematorio tirado por caballos que ha rendido unos resultados francamente satisfactorios. En la parte superior lleva una caja receptora, en la que se arroja la basura. Cuando está llena, se tira de una varilla sujeta al fondo deslizante y el contenido de la caja cae al horno que hay debajo. Al carro le sigue un furgón que recoge las cenizas y los desperdicios que no pueden ser consumidos. Se prevé que este crematorio ambulante, con dos furgones de desperdicios siguiéndole, remplazará a quince o veinte furgones de basura ordinarios.»



Incinerador de basuras ambulante de Chicago

Instrumentos matemáticos del siglo XVI

Los científicos e ingenieros al servicio de la corona española —hegemónica en el siglo XVI y en plena expansión americana— manejaron y perfeccionaron ingeniosos instrumentos matemáticos para la medida de alturas y distancias

Mª Isabel Vicente Maroto

Durante el Renacimiento, España se enfrentó a diferentes problemas de carácter técnico, surgidos tanto de sus esfuerzos por mantener su situación de potencia dominante en Europa como de su actividad colonizadora: realización de grandes obras hidráulicas, construcción de nuevas ciudades, puertos y fortificaciones, trazado de planos y levantamiento de mapas, confección de las cartas náuticas con las rutas marítimas que se iban abriendo, etcétera. Para resolverlos trabajaban al servicio de la corona numerosos ingenieros, arquitectos, artilleros y cosmógrafos.

En último término, esos problemas se reducían a medir, junto con el tiempo, distancias, alturas, anchuras y profundidades. Para la determinación de éstas, se empleaban astrolabios, cuadrantes, cuadrados geométricos, espejos, varas, báculos, trinormos, niveles y otros. Una revisión de los textos españoles del siglo XVI, impresos o manuscritos, y de documentos de diferentes archivos nos permite conocer la forma, material en que se fabricaban y los distintos modos de utilización, según el problema a resolver.

El fundamento científico de estos intrumentos se encuentra en la geometría euclídea, esencialmente en las relaciones existentes entre triángulos semejantes y en la teoría de las proporciones. La obra de Euclides alcanzó una gran difusión en el siglo XVI, imprimiéndose inicialmente en las lenguas clásicas y en la segunda mitad de la centuria en lenguas vulgares.

La Europa renacentista seguía empleando, en un comienzo, instrumentos medievales, fundamentalmente los destinados a la observación astronómica: astrolabios, torquetes, esferas armilares, ecuatorios y otros, con leves modificaciones. Su uso se popularizó fuera de las universidades entre príncipes, prelados y cortesanos adinerados, para quienes servían además como decoración de gabinetes, siendo ésta la procedencia de la mayoría de los instrumentos que han llegado hasta nosotros.

Para Carlos V trabajaron y construyeron instrumentos, entre otros, Pedro Apiano, Gemma Frisio, Mercator y Alonso de Santa Cruz, quienes le dedicaron también algunas de sus obras. Felipe II, consciente de la necesidad de buenos técnicos en sus reinos, creó en 1582 la Academia de Matemáticas de Palacio, nombrando como catedrático al portugués Juan Bautista Labaña y a Pedro Ambrosio de Ondériz como su ayudante, ocupado en traducir las obras que se le mandaren. El propio monarca y Juan de Herrera, que como Aposentador Mayor de Palacio controlaba todas las actividades de la Academia, pusieron un gran empeño en que se enseñaran "las matemáticas" —que entonces tenían un carácter muy amplio y abarcaban aritmética, geometría, astronomía y cosmografía— en nuestra lengua, y en que se tradujeran las principales obras científicas y técnicas de la época.

La enseñanza debía desarrollarse en tres cursos en los que se "leían", o dictaban y glosaban, en los dos primeros *La Esfera*, *Teóricas de los Planetas*, las *Tablas* del Rey don Alonso, *Los seis libros primeros de Euclides* (de los cuales los cuatro primeros tratan de geometría plana y el V y VI de la teoría de las proporciones) y el *Almagesto* de Ptolomeo; en el último curso, *cosmografía, navegación y algunos instrumentos*. Este plan de estudios era semejante al seguido en la cátedra de astrología de Salamanca, pero con la particularidad de impartirse en castellano, para que pudieran acceder a él muchos técnicos, aunque desconocieran el latín.

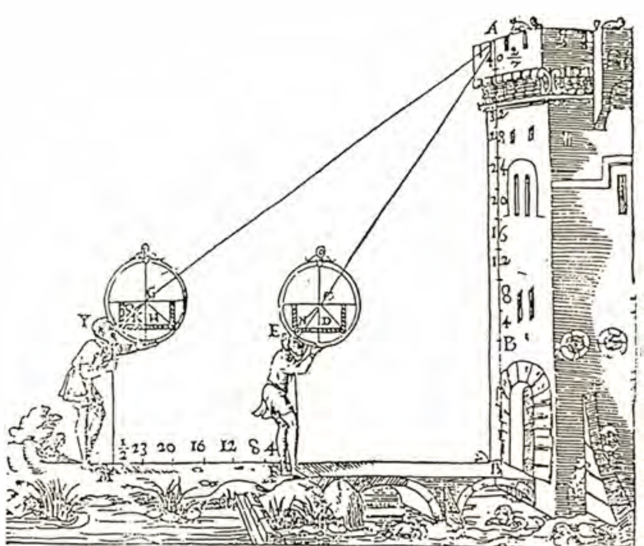
En el monasterio de El Escorial, Felipe II fundó un colegio y le dotó de una magnífica biblioteca, con un gabinete provisto de todo tipo de instrumentos matemáticos, astronómicos y relojes. A través de documentos de diferentes archivos españoles, sobre todo del General de Simancas, sabemos que muchos de los instrumentos para la biblioteca escurialense llegaron de los Países Bajos y también de Italia, enviados por los embajadores españoles. El propio rey donó astrolabios, planisferios, cuadrantes, esferas y demás, construidos por matemáticos a su servicio; uno de los más destacados, el burgalés Andrés García de Céspedes (muerto en 1611), construyó muchos de ellos, algunos de su invención. En la actual biblioteca del monasterio no queda rastro de todos estos instrumentos; muchos debieron de pasar a la Academia de Matemáticas y los demás serían pasto de las llamas en el incendio de 1671. En el Museo Nacional de Ciencia y Tecnología de Madrid se guardan algunos ejemplares muy valiosos de instrumentos españoles de los siglos XVI y XVII.

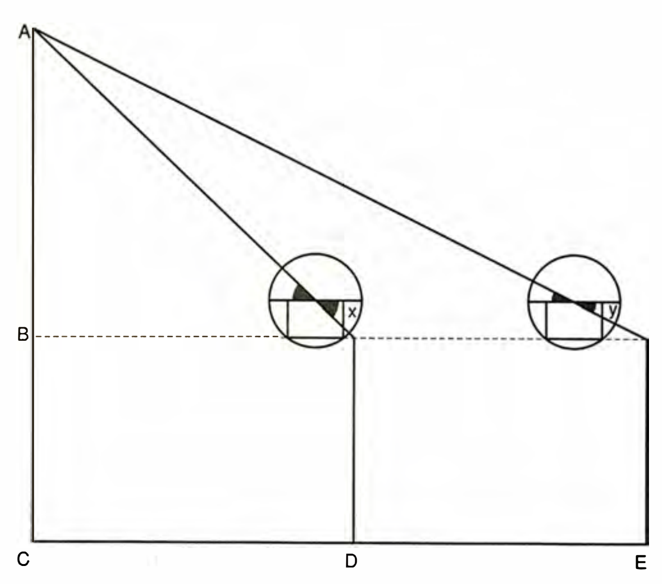
Centrándonos en los instrumentos

Mª Isabel Vicente Maroto se halla adscrita al departamento de física aplicada de la Universidad de Valladolid. Realiza su trabajo de investigación en historia de la ciencia, fundamentalmente en los siglos XVI y XVII; es autora de numerosos artículos y coautora de varios libros, entre ellos *Fuentes para la Historia de la Ciencia y la Técnica en la Biblioteca del Palacio de Santa Cruz* y *Aspectos de la ciencia aplicada en la España del Siglo de Oro.*



1. DORSO DEL ASTROLABIO, que servía para medir alturas, distancias y profundidades (*izquierda*). En la parte inferior de su superficie central lleva la *escala altímetra* o doble cuadrante de sombras, horizontal o recta y vertical o versa, con doce divisiones en cada una de ellas. Se completa con una *alidada,* o regla de la misma longitud que el diámetro del astrolabio, que lleva dos *pínulas* en sus extremos (pequeñas tablillas perpendiculares con orificios centrales). Las observaciones se realizaban haciendo girar la alidada sobre el eje central, dirigiendo la visual, a través de las pínulas, al extremo de la longitud a medir. (Este astrolabio es idéntico al descrito por Juan de Rojas, incluyendo el modelo de anilla). En el grabado de abajo se ejemplifica su uso para medir alturas inaccesibles. Como muestra la figura, eran necesarias dos observaciones desde dos puntos distintos, conociendo la distancia entre ellos. Para la medida de una altura accesible se realizaba una sola observación, desde un punto situado a una distancia conocida. La alidada permite construir en una de las dos escalas, versa o recta, según que la distancia sea mayor o menor que la altura, un triángulo semejante al formado desde el punto de observación con la altura y la distancia a la torre. (La figura corresponde al libro de Juan de Rojas *Commentariorum in astrolabium quod planisphaerium vocant*, París, 1550.)





matemáticos para la medida de alturas, distancias y profundidades, importa saber que cualquiera que fuera el instrumento utilizado y el procedimiento de medida al que se acudía, el método era siempre el mismo: construir o representar un triángulo semejante al formado entre el punto de observación y los extremos de la magnitud que se desea conocer. Al no utilizar ecuaciones algebraicas, recurrían a demostraciones geométricas, de pesada prolijidad.

El *astrolabio* es el instrumento más difundido de la astronomía antigua. Pero sus usos geodésicos quedaron ignorados porque, cuando los tratados andalusíes sobre astrolabios se tradujeron al latín, se omitieron generalmente dichas aplicaciones. Podría afirmarse que todos nuestros instrumentos modernos no son más que partes de astrolabios más o menos perfeccionados.

De origen griego, el astrolabio pasó al Islam y fue introducido en Occidente antes del año mil. Los musulmanes españoles heredaron una brillante tradición astronómica, introdujeron las tablas y los almanaques e idearon la azafea de Azarquiel o modalidad de astrolabio universal. En toda la Edad Media europea, la enseñanza de la geometría práctica se desarrolló alrededor del astrolabio; en el siglo XVI se imprimieron numerosos tratados sobre el mismo.

El astrolabio, de un grosor de milímetros, tiene forma circular, con un diámetro que oscila entre los diez y los cuarenta centímetros. Se fabricaba principalmente de latón. Las dos caras del armazón, o la *madre*, se llaman *faz* y *dorso*. Porta en la parte superior una *anilla* que permite colgarlo.

La *faz,* utilizada para medidas astronómicas, ha sido la cara más estudiada; consta de la araña, el tímpano y la corona circular. El *dorso* es la parte que nos interesa destacar. Se utilizaba en altimetría. Aunque no es igual en todos los astrolabios, suele llevar en el limbo diferentes anotaciones: la graduación de los cuatro cuadrantes de círculo de 0 a 90º, un calendario zodiacal o referencia al lugar que ocupa el Sol cada día del zodiaco y un calendario con indicación de los meses y los días del año. La superficie central, dividida en dos partes, lleva

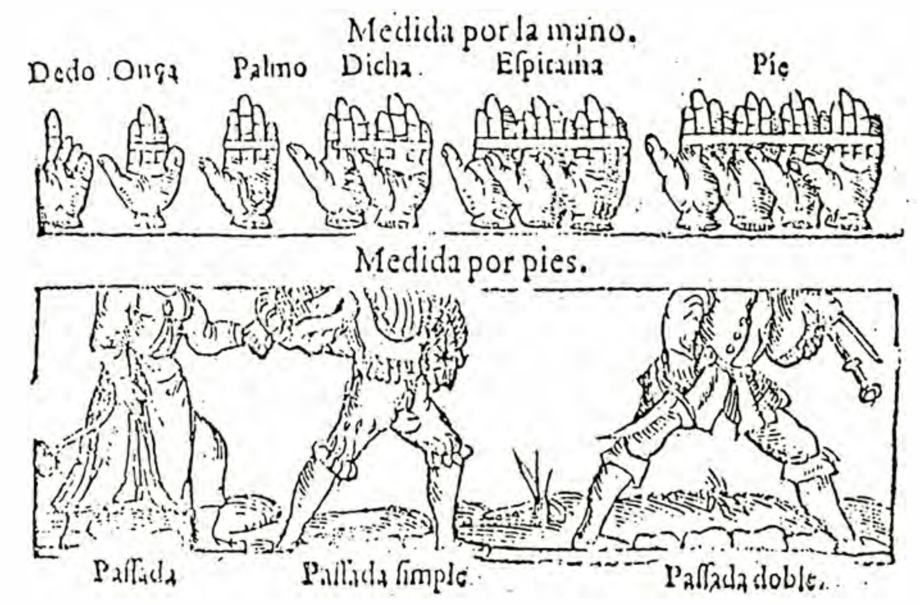
en la superior un doble cuadrante de curvas horarias iguales y desiguales: las horas iguales corresponden a nuestro día natural; las desiguales son cada una de las partes en las que puede dividirse el intervalo de tiempo de un día natural, y no tienen por tanto igual duración a lo largo del año. En la inferior se dibuja la *escala altímetra* o doble cuadrante de sombras, vertical o "versa" y horizontal o "recta", divididas cada una de ellas en doce partes iguales; esta escala altímetra servía para medir alturas, distancias y profundidades.

El astrolabio se completa con las *alidadas,* o reglas de la misma longitud que el diámetro del instrumento, con dos pínulas en sus extremos (pequeñas reglillas perpendiculares, con un orificio para mirar a su través); las observaciones se realizaban haciendo girar la alidada sobre el eje central, perpendicular al astrolabio por su punto medio.

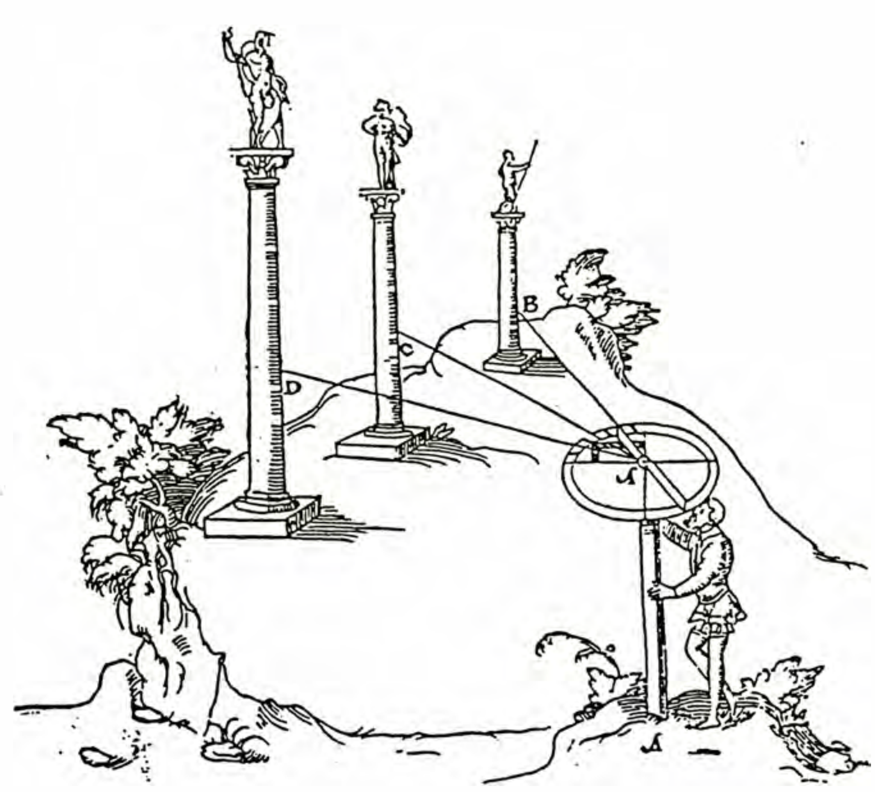
Para medir, por ejemplo, la altura de una torre accesible, se sujeta el astrolabio con la mano por la anilla dejándolo colgar; se levanta hasta que la visual que pasa a través de las pínulas de la alidada se dirija exactamente al extremo superior de la torre: en una de las dos escalas de las sombras, versa o recta, según que la distancia a la torre sea mayor o menor que su altura, se marcarán las divisiones correspondientes a la posición de la alidada, y, por semejanza de triángulos, conocida la distancia al pie de la torre y la altura de los ojos del observador al suelo se calculará la altura buscada. En notación actual, sobre la escala vertical mediríamos la tangente del ángulo de mira y sobre la horizontal la cotangente.

Un instrumento semejante al dorso del astrolabio y a menudo confundido con él es el denominado *planisferio*. Se compone de un círculo dividido en cuatro cuadrantes graduados, en cuyo centro pivota una regla provista de pínulas; en ocasiones llevaba también una brújula. Se montaba sobre un soporte articulado y se utilizaba en el plano horizontal, para la medida de ángulos de posición, mientras el dorso del astrolabio servía para la medida de ángulos en el plano vertical.

Otro útil astronómico aprovechado para mediciones topográficas era el *anillo de tres círculos*, uno representando el meridiano del lugar, el segundo el ecuador y el tercero, sosteniendo dos pínulas, el plano meridiano donde está el Sol. Colgado del



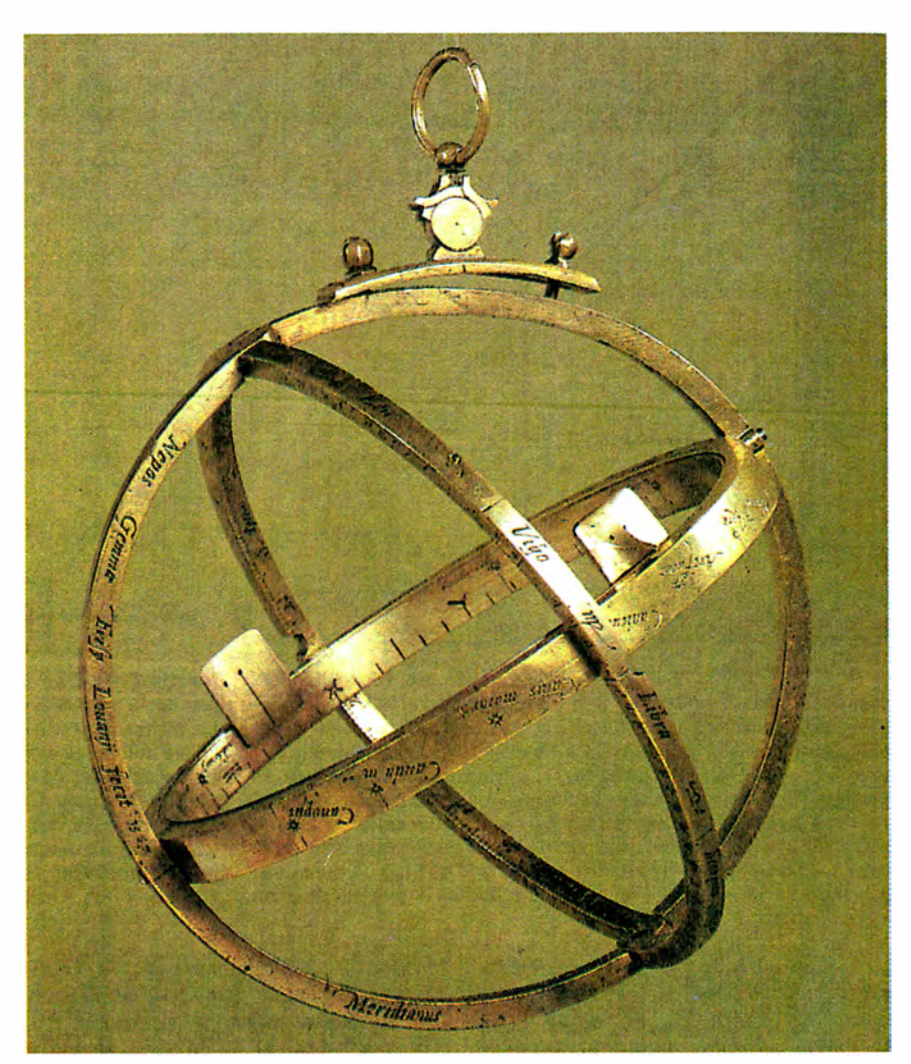
2. UNA MEDIDA, definida por Gemma Frisio en el siglo XVI como "una longitud cierta y determinada por la cual se mide al ojo la distancia de los lugares no conocida", podía divirse en diferentes partes. La unidad o parte más pequeña era el *grano de cebada*. Las siguientes se referían a la mano: *dedo*, equivalente a cuatro granos de cebada; *onza* o tres dedos; *palmo* o cuatro dedos; *dicha*, equivalente a dos palmos; *epistama*, tres palmos; *pie*, cuatro palmos. O podían referirse a una medida por pies: *pasada*, equivalente a dos pies; *pasada simple* o dos pies y medio; *pasada geométrica*, cinco pies. Las unidades mayores eran *codo* o seis palmos; *estadio* o 125 pasos; *legua*, 1500 pasos, y ya leguas alemanas, francesas o españolas, con valores diferentes para cada una de ellas.



3. PLANISFERIO, semejante al dorso del astrolabio, estaba sin embargo dotado de un pie para ser utilizado en el plano horizontal. Es un instrumento muy cómodo para "describrir o situar los lugares" midiendo ángulos de posición, asentando el planisferio en un punto determinado; conocidos dichos ángulos, marcados sobre la graduación del planisferio, y medidas las distancias entre las figuras podía dibujarse el plano. (La figura corresponde también al libro de Rojas *Commentariorum in astrolabium quod planisphaerium vocant*.)

punto conveniente según la latitud, el *anillo astronómico* deja pasar un rayo que proyecta un punto sobre el cuadrante ecuatorial. No está provisto de guía o dioptra porque los puntos luminosos sólo pueden caer sobre el cuadrante cuando el anillo está convenientemente orientado. Se le usaba también —utilizando el círculo interior, dividido en doce particiones y provisto de pínulas— para medir alturas de manera semejante al dorso del astrolabio.

La descripción y uso de estos instrumentos aparecen recogidos en textos españoles de la época, de carácter muy dispar. Unos se ciñen al astrolabio, con algunos capítulos dedicados a medidas geodésicas; otros libros de geometría práctica incluyen la justificación geométrica de la resolución; por último, los textos de fortificación o artillería explican la manera de medir alturas o distancias con el astrolabio y otros instrumentos, sin demasiadas consideraciones geométricas, pues generalmente iban dirigidos a técnicos no muy versados en matemáticas.



4. ANILLO DE TRES CIRCULOS, donde uno representa el meridiano del lugar, el segundo el ecuador y el tercero, sosteniendo dos pínulas, el plano meridiano donde está el Sol. Servía para muchos usos astronómicos, colgando el anillo del punto conveniente según la latitud. Pero se le usaba también en altimetría —utilizando el círculo interior, dividido en doce particiones desiguales y dirigiendo la visual a través de las pínulas— de manera semejante al dorso del astrolabio.

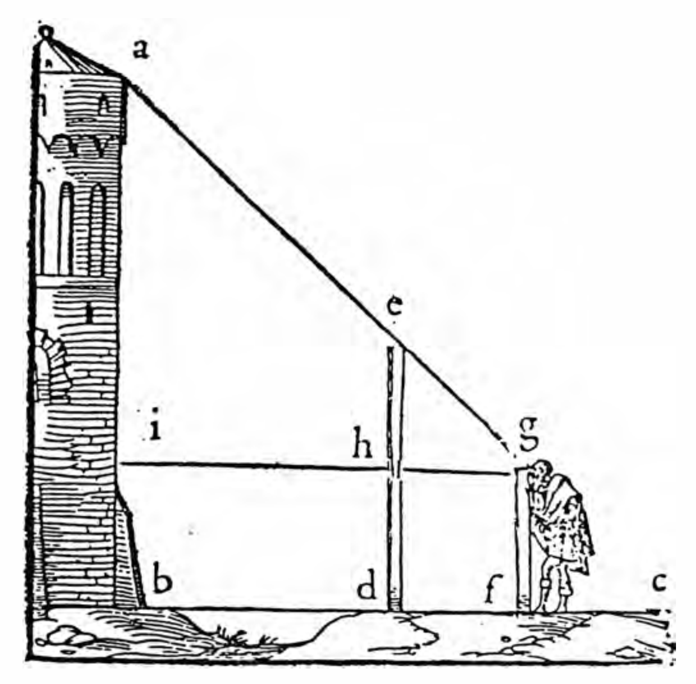
Manuscritos sobre el astrolabio del siglo XVI se guardan en las principales bibliotecas o archivos; muchos de ellos son anónimos y suelen ser copias de los impresos que más circularon.

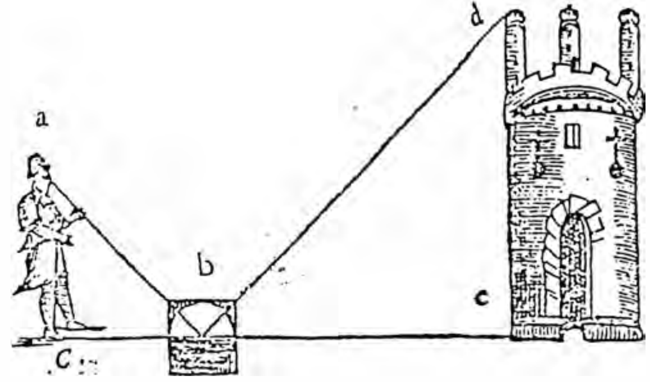
Entre los impresos destaca el tratado *De usu astrolabii compendium*, publicado en París en 1520, por el médico valenciano Juan Martín Población, astrónomo y profesor de matemáticas allí. Libro muy completo, reeditado varias veces, describe todos los usos del instrumento, incluyendo una parte dedicada a la altimetría. Un tratado semejante, también publicado en París, en 1550, es *Commentariorum in Astrolabium quod planisphaerium vocant*, escrito en castellano por Juan de Rojas en España, entre 1545 y 1546, y dedicado a Carlos V; a él se refieren después muchos otros autores, como los italianos Cosimo Bartoli e Ignacio Danti (que reproduce casi íntegro el tratado de Rojas).

La *Cosmographia* de Pedro Apiano, modificada por Rainier Gemma Frisius, a la que añadió su *Libellus de locorum describendorum ratione* (Amberes, 1533), gozó de una gran difusión y se tradujo a todas la lenguas europeas. El sobrenombre, Frisius, le viene de su lugar de nacimiento en Dokkum, Friesland (1508), pero es considerado hispanoholandés porque mantuvo un estrecho contacto con la corte de España, aunque residiese en Bruselas. De su taller y el de sus sucesores salieron muchos de los instrumentos que hoy se conservan en los museos. Una traducción al castellano de la obra de Apiano y Frisio apareció en 1548: *Libro de la Cosmographía* de Pedro Apiano, traducción literal de una edición de Amberes de 1540. En su *Librito de la manera de describir o situar los lugares, y de hallar las distancias de aquellos, nunca visto hasta agora*, Gemma Frisio introduce y explica la forma de realizar la triangulación geodésica de una provincia, midiendo ángulos de posición con un planisferio, y distancias de diferentes maneras, entre ellas con sólo cuatro piedras. Frisio escribió también un clásico tratado sobre el astrolabio, *De Astrolabo Catholico liber*, válido para todas las latitudes y dedicado a Felipe II.

El manejo del astrolabio y del planisferio para altimetría se recogía también en los textos de artillería. Lo comprobamos, de manera señalada, en el de Alava y Viamont, *El Perfeto Capitán, instruido en la disciplina Militar, y nueva ciencia de la Artillería*, publicado en Madrid en 1590 y dedicado a Felipe II. El libro cuarto "en que se trata de todos los géneros de medidas necessarios para el uso de la Artillería con Planisferio, Astrolabio, Quadrante y otros instrumentos Matemáticos" comienza resaltando la importancia para los artilleros de realizar las medidas con precisión, saliendo al paso de los problemas más frecuentes que se les podían plantear.

En la España renacentista persistían otros procedimientos antiguos de medida, mediante varas, piedras o espejos. Para medidas accesibles y no demasiado grandes se utiliza-





5. DOS FORMAS DE MEDIR LA ALTURA DE UNA TORRE, con dos varas (*izquierda*) y con un espejo (*derecha*). En el primer caso, la altura a medir es *ab*; la dos varas poseen longitud conocida, *ed* y *gf*. Se coloca la más larga, verticalmente, a una distancia conocida de la torre, *bd*; para situar, también en vertical, la otra vara, debe buscarse una posición tal que mirando a través de su extremo *g* se vea el extremo *e* de la primera vara perfectamente alineado con el punto más alto de la torre *a*; por semejanza entre los triángulos formados: $ai = (ig/hg) \times eh$; $ab = ai + ib$. (La figura ilustra el tratado de Juan Martín Población *De usu astrolabii Compendium*). En el ejemplo de la derecha se trata de un procedimiento muy antiguo. La altura buscada es *dc*; en el llano, a una distancia conocida, *bc*, se coloca el espejo; el observador debe situarse en una posición tal que, de pie, vea reflejado en el espejo el punto más alto de la torre. Conocidas las distancias, *bc* y *eb*, y la altura desde los ojos del observador, *ae*, de la semejanza entre los triángulos formados se deduce que $dc = (bc/eb) \times ae$. (Así lo explica el bachiller Juan Pérez de Moya en su *Geometría Práctica y Speculativa*, Alcalá, 1573).

ban cuerdas de longitud conocida. Pero en ocasiones, y sobre todo para medidas grandes o no accesibles, se valían de varas, piedras o espejos. El procedimiento empleado era siempre, básicamente, el mismo: construir o representar, con los materiales que se utilizaran, un pequeño triángulo semejante al que forman los extremos de la medida y el lugar desde donde se realizaba la operación. Estos métodos requerían sobre todo habilidad e ingenio en el experimentador.

Mediante una vara puede medirse una altura accesible, por ejemplo una torre, conociendo la distancia a ella. Jerónimo Girava utiliza una vara "razonablemente larga", dividida en doce partes, y explica el método con estas palabras: "Hínquese después el palo al nivel en el llano terrestre: el qual hace rectos ángulos de todas partes con la altura dada. Metiendo después el ojo en tierra, acercándose y apartándose del mismo palo hasta tanto que por la cima del palo parezca justamente lo más alto de la altura dada y midiendo la distancia entre el pie del palo y el ojo: con la misma medida en que fue el dicho palo partido, se alcanzará la altura".

El texto corresponde a la traducción de *Los dos libros de la Geometría Práctica* de Oroncio Fineo que se conserva manuscrita en la Biblioteca Nacional de Madrid, fechada en 1553. Fue realizada por el cosmógrafo Girava y ordenada por el ingeniero Pedro Juan de Lastanosa, con unas magníficas figuras que hacen pensar que estaba preparada para una edición que lamentablemente no llegó a realizarse.

Con dos varas o reglas, una de doble longitud que la otra, miden alturas otros tratadistas españoles. La denominada "regla status" por Pérez de Moya —buen divulgador de los conocimientos científicos de la época— es un sencillo instrumento formado por dos reglas dispuestas en forma de cruz, cuyo principio de utilización es el mismo que el de las dos varas: formar triángulos semejantes.

Pueden utilizarse igualmente cuatro piedras para calcular la distancia a cualquier lugar, una torre desde un punto en un llano, que se señala con una piedra o una vara. El observador avanza en línea recta hacia la torre una distancia conocida, hasta un punto en donde deja una segunda señal; a continuación se desplaza hacia un lado, en dirección perpendicular, otra distancia conocida, dejando una tercera vara o piedra; retrocede hasta la señal primera y se mueve de nuevo en perpendicular hacia el mismo lado, hasta un punto desde el cual vea la torre alineada con la señal tercera. Así habrá conseguido dibujar sobre el terreno dos triángulos rectángulos semejantes con vértice en la torre, dos lados comunes y bases paralelas: mediante una sencilla proporción se calcula la distancia.

El cálculo de la altura de una torre se puede realizar fácilmente utilizando un espejo colocado sobre un llano próximo a ella; el observador debe situarse en una posición tal que de pie vea reflejada en el espejo el extremo de la torre; conociendo las distancias del espejo a la base de la torre y al observador, y la altura de éste, por medio de la semejanza entre los triángulos formados se hallará la altura buscada.

Desde la Edad Media se venía empleando también el *cuadrante de círculo*, un instrumento muy semejante al dorso del astrolabio. Se construía de diferentes materiales, aunque el más frecuente era el latón, y estaba formado por un cuadrado de sombras inscrito en un cuarto de círculo; llevaba también un hilo colgado a plomo de su ángulo recto, el perpendículo, e iba provisto de pínulas fijas, soldadas en el borde supe-

rior del aparato. En el cuadrante, las sombras con respecto al astrolabio deben estar invertidas: estando perpendiculares, igual que en el astrolabio, el ángulo de visión no se marca como en este instrumento con respecto a la horizontal, sino que en el cuadrante lo determina el hilo vertical a plomo.

Los había de tamaño muy diverso y con diferentes graduaciones, cuya precisión era esencial; en todos los textos los autores insisten en que, para cualquier tipo de instrumento, cuanto mayor tamaño, mejor precisión podía conseguirse. Según la finalidad de su utilización se le dotaba de diferentes monturas: portátiles, con pie fijo u orientables.

La forma de utilización en altimetría es semejante a la del dorso del astrolabio y se encuentra perfectamente explicada en algunos textos de artillería, pero sobre todo en los de geometría. El cuadrante que describe Andrés García de Céspedes en su *Libro de instrumentos nuevos de Geometría* (Madrid, 1606), es algo diferente en su construción y sobre todo su autor demuestra unos buenos conocimientos matemáticos en las demostraciones que acompaña, además de un excelente ingenio.

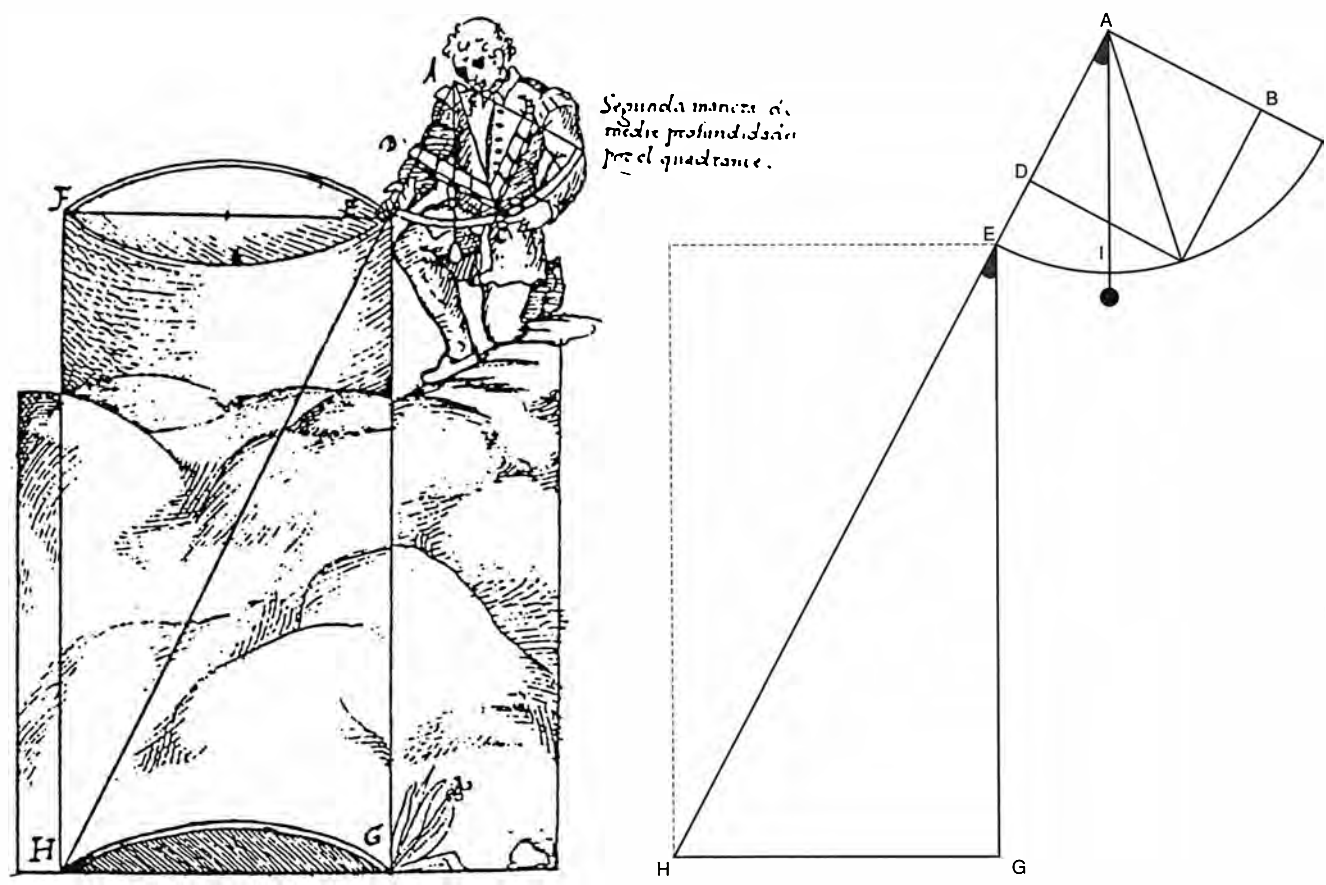
Especial relevancia adquirió, durante los siglos XVI y XVII, *el cuadrado geométrico.*

De fácil montura y cómodo manejo recuerda, en su concepción, al cuadrante, si bien deriva de la escala altímetra del dorso del astrolabio. Por estar fabricado en madera no se han conservado ejemplares, a diferencia de los astrolabios y cuadrantes fabricados generalmente en latón.

Está formado por cuatro reglas iguales, de medio pie de ancho (unos 14 centímetros) y dos o tres codos de largo (de 84 a 126 centímetros), unidas en ángulo recto formando un cuadrado. Dos de los lados contiguos se dividen en sesenta partes iguales, y del ángulo opuesto sale una regla en diagonal, semejante a la alidada con pínulas del dorso del astrolabio. La regla puede girarse para dirigir la visual a través de las pínulas hacia el extremo de la longitud que se desea medir, marcando las divisiones correspondientes al punto de corte de dicha regla con uno de los lados del cuadrado. Por semejanza de triángulos se calculaban alturas, distancias y profundidades.

La descripción y la manera de utilizar el cuadrado geométrico se encuentra en textos de geometría práctica, como los de Pérez de Moya; en diferentes libros de artillería, como los del capitán Cristóbal de Rojas, ingeniero militar al servicio del Rey; y en un importante manuscrito sobre ingeniería, *Los veintiún libros de los ingenios y de las máquinas*, escrito en la segunda mitad del siglo XVI por Pedro Juan de Lastanosa.

Desde el siglo XIV, e inventado por Leví ben Guersón, se conocía el *báculo mensorio*, llamado también *báculo de Jacob*, *báculo astronómico* o *ballestilla* en navegación. Determinaba distancias angulares entre cuerpos celestes. Alcanzó una enorme popularidad con su utilización en la navegación de altura, por su comodidad y rapidez en el cálculo para tomar alturas del sol y de la estrella polar, a fin de establecer la hora local y la latitud. Se aplicó también en observa-



6. MEDICION con el *cuadrante* de la profundidad de un pozo, *EG*, cuyo diámetro *EF* se calcula previamente. El cuadrante debe colocarse de modo que su lado *AD*, que lleva las dos tablillas con orificios o pínulas, se apoye sobre el brocal en el punto *E*; se alza o baja el cuadrante, dejando caer el perpendículo a plomo, hasta que a través de las pínulas aparezca el punto *H*: marcando sobre la escala del cuadrado inscrito en el cuadrante el punto *I* que señala el perpendículo, la proporción entre lados de triángulos semejantes permite deducir $EG = (DA/DI) \times HG$. (Grabado perteneciente a *Los dos libros de la Geometría Práctica* de Oroncio Fineo, traducidos por Girava en 1553. B. Nacional de Madrid, Ms-9437.)

ciones terrestres y en ingeniería militar.

Consta de dos estrechos listones, el radio y el transversario, el primero mucho más largo que el segundo y formando una cruz (unos 150 y 25 cm respectivamente). Una graduación adecuada sobre el radio permite determinar el ángulo subtendido por el transversario, cualquiera que sea la distancia a uno de los extremos del radio a que se sitúe; observando desde ese extremo, y haciendo coincidir los dos extremos del transversario con los extremos de la longitud a medir, mediante su deslizamiento en uno u otro sentido, se puede calcular dicha longitud. Aunque la utilización del cayado de Jacob para medida de alturas o distancias aparece descrita en varios textos de geometría práctica, solamente Andrés García de Céspedes, en su *Libro de instrumentos nuevos de Geometría* (Madrid, 1606), desarrolla el fundamento geométrico y da una completa demostración matemática.

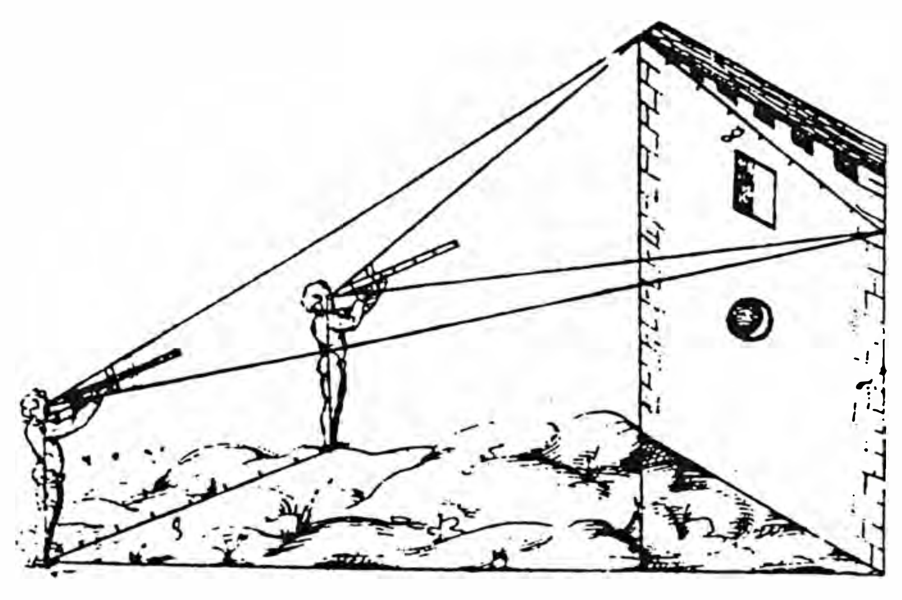
El *radio astronómico*, descrito por el hispano-holandés Gemma Frisio en su libro *De Radio Astronomico et Geometrico Liber* (Amberes, 1545), consta de dos reglas de latón cuadradas y pulidas para que deslicen fácilmente una sobre otra, radio y transversario, donde se marcan las divisiones. La principal diferencia con respecto al báculo es que al transversario se le añade una pínula en cada extremo de manera que puedan estar alineadas, lo que permite diferentes formas de utilización de este radio astronómico, tanto en astronomía como en geometría.

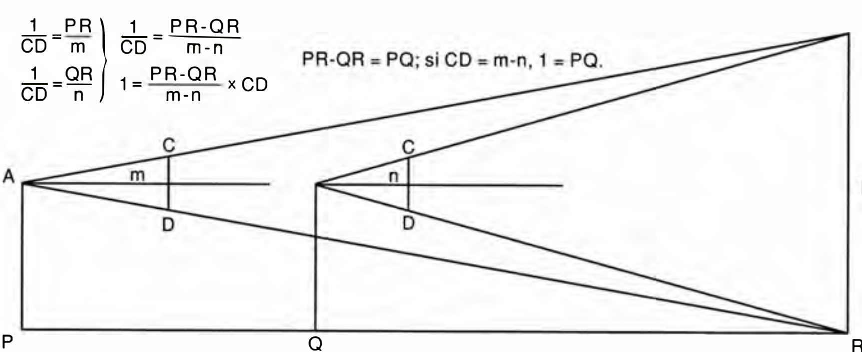
A finales del siglo XVI existían diferentes variantes de instrumentos formados por tres reglas, dos de ellas articuladas sobre una tercera. En tres voluminosos tomos manuscritos de la Biblioteca Nacional de Madrid se recogen diferentes trabajos matemáticos y astronómicos de Juan Cedillo Díaz, sucesor en 1611 de García de Céspedes como cosmógrafo mayor y catedrático de matemáticas de la Academia de Palacio, dependientes ambos oficios del Consejo de Indias desde 1591. Entre los trabajos de Cedillo, escritos desde finales del siglo XVI, se encuentran dos tratados dedicados a instrumentos de tres reglas.

El *trinormo* (o triple regla) fabricado en latón o madera, constaba de dos reglas "anchas", unidas a una tercera, el doble de larga que las anteriores, la mitad de ancha y el mismo grosor; su longitud total no superaba los 170 centímetros y su peso no alcanzaba el kilogramo si era de madera, o los cinco kilogramos si se construía de latón. Por consiguiente resultaba muy manejable y de fácil transporte, sirviendo, además, de instrumento de dibujo.

En catorce proposiciones explica Cedillo formas muy diversas e ingeniosas de utilizar su trinormo para resolver diferentes problemas: medir la inclinación de un muro; medir ángulos de posición; "describir una provincia"; tomar la planta de una isla, castillo o ciudad; calcular distancias, alturas y profundidades; tomar la altura del Sol sobre el horizonte o conocer la altura del Polo. El procedimiento era siempre al mismo: construir con las tres reglas triángulos semejantes al formado entre el punto de observación y la medida a realizar. En otro tratado describe un instrumento semejante al trinormo, pero la tercera regla, llamada base, está montada sobre un cursor y se deplaza a lo largo de la primera.

Atendamos, por último, a los instrumentos de nivel. Indispensables en una gran variedad de obras de ingeniería, han adoptado innumerables formas desde la antigüedad. Ya Vitruvio, en *Los diez libros de Arquitectura* dedica un capítulo al modo de nivelar las aguas y los instrumentos necesarios para ello. En la España del Siglo de Oro en que, al igual que en el imperio romano, se emprenden grandes obras civiles, la traída de aguas era una constante preocupación. La primera operación



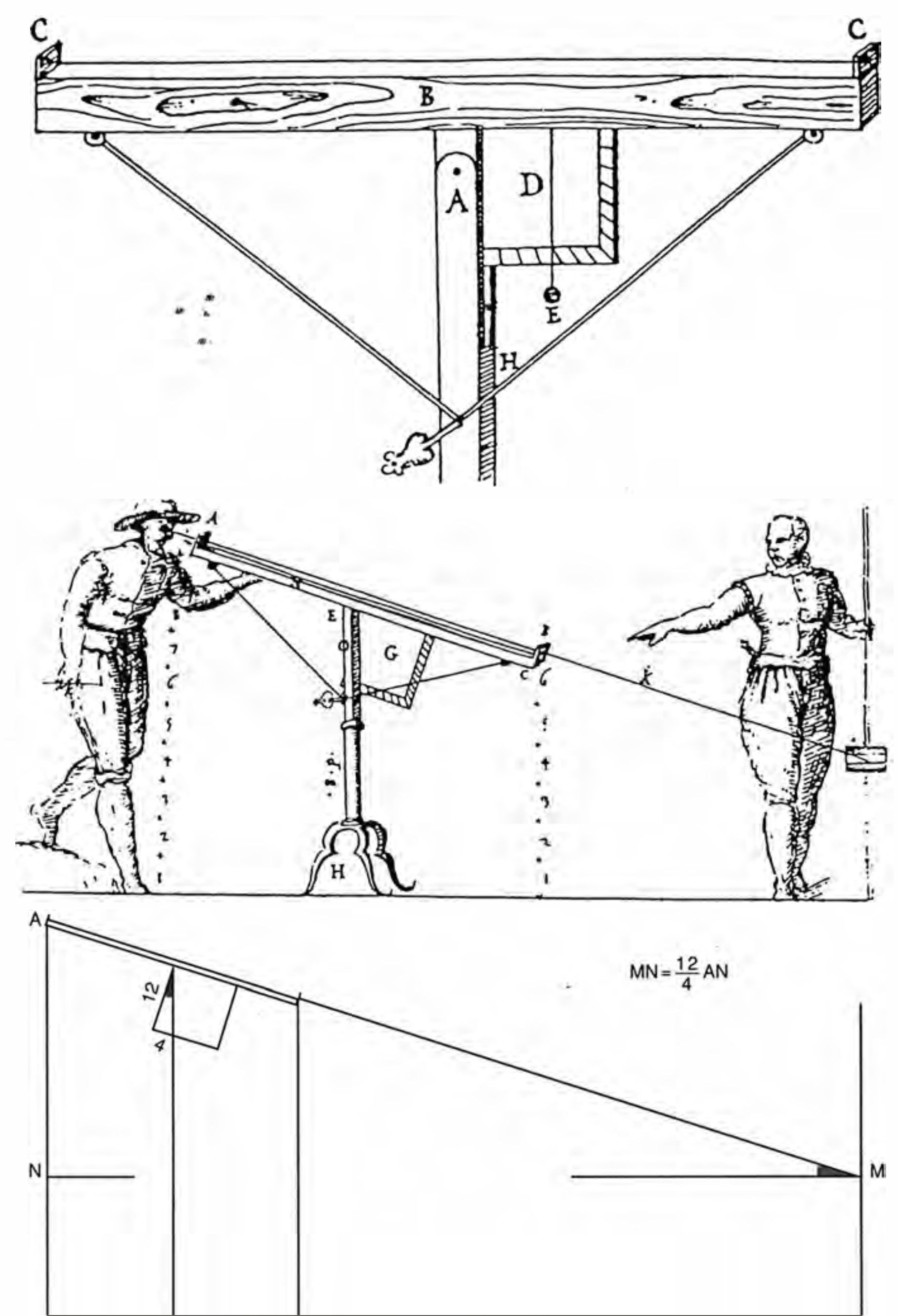


7. BACULO DE JACOB, o ballestilla, aplicado a la medición de anchuras. Está formado por dos listones de madera, uno largo y estrecho, *AB*, dividido en 10, 8 o 6 partes, llamado *radio*, y otro más ancho, *CD*, llamado *transversario*, de una longitud igual a una de las partes en que se ha dividido el radio. El transversario lleva un orificio en el centro para que el radio le pueda atravesar y moverse siempre en ángulo recto, adelante y atrás. Para realizar una medida se coloca el tranversario en cualquier división a partir de *A* y, encarando el báculo, el observador habrá de alejarse o acercarse hasta que por los dos extremos *CD* del transversario se vean los de la longitud a medir; se marca en el suelo la posición de la primera medida. Luego se mueve el transversario una división hacia adelante (o hacia atrás) y el observador deberá alejarse (o acercarse) una distancia tal que, encarando el báculo, vea de nuevo a través de los extremos del transversario los de la longitud a medir: la distancia entre los dos lugares de observación será la anchura buscada. Tendremos, pues, que PR — *QR* = *PQ*, si *CD* = *m* — *n*, *l* = *PQ*. (Tomado de *Los dos libros de la Geometría Práctica* de Oroncio Fineo.)

a realizar era la nivelación del terreno, que se confiaba a personas experimentadas en esta labor, los llamados niveladores; aunque en los casos más delicados se recurría a ingenieros o matemáticos, por sus mayores conocimientos de geometría. La bondad de la nivelación, y por tanto el prestigio personal del nivelador, dependía de la exactitud de las medidas de los desniveles existentes, y éstas, de la precisión del instrumento utilizado, por lo que su construcción se mantenía habitualmente en riguroso secreto.

Entre los diferentes tipos de niveles que aparecen descritos —principalmente en obras manuscritas— existen numerosas variantes, cada una con su propio nombre, pero con la característica común de su gran tamaño, requisito para conseguir una mayor precisión. El más sencillo es el llamado *nivel de tranco*, en forma de A de gran tamaño (la altura podía llegar a los dos metros), de cuyo vértice colgaba un hilo a plomo y con la graduación marcada sobre la traviesa del nivel. Dicha graduación podía hacerse empíricamente o bien por consideraciones geométricas, mucho más complejas.

Un ambicioso proyecto ordenado por Felipe II en 1566 fue la descripción o "corografía" de España, realizada por el maestro Esquivel y su ayudante Diego de Guevara; a la muerte de éstos, todos sus papeles e instrumentos fueron recogidos por orden del rey y entregados a Juan de Herrera. En dicho proyecto participaron López de Velasco, Lastanosa y probablemente también el arquitecto real, quien llevó a cabo otros importantes trabajos de nivelación, uno de ellos para la traída de agua a la ciudad de Valladolid. Al nivel utilizado por Juan de Herrera se refieren dos libros publicados en el mismo año, 1606: *Geometria Practica*, escrito en latín por el jesuita italo-alemán Clavio, y el *Libro de instrumentos nuevos de geometría* de García de Céspedes. Probablemente, la reconocida habilidad y precisión de las mediciones del famoso arquitecto se debieran a este nivel.



8. INSTRUMENTO DE NIVEL, ingeniado para medir desniveles y distancias a la vez. Lo encontramos descrito en el manuscrito de la B. N. de Madrid de *Los veintiún libros de los ingenios y de las máquinas*. El desnivel entre dos puntos se mide dirigiendo la visual a través de los dos orificios de las tablillas *C* y *D* hacia el punto deseado, en donde se coloca una regla que debe tener señaladas divisiones (en palmos o dedos). Para poder medir la distancia entre los dos puntos en el centro del pie del nivel *A* se acopla un cuadrado *D*, que puede subir o bajar gracias a la hendidura *H* del pie; el perpendículo *E* permite saber si el instrumento está perfectamente horizontal.

En el siglo XVI los instrumentos matemáticos que hemos descrito se utilizaban de la misma forma en todos los reinos y repúblicas del Occidente europeo. España, como monarquía hegemónica en Europa y en plena expansión americana, estaba obligada a defender sus inmensos territorios, para lo que era imprescindible poseer una base científica y técnica muy amplia. La revisión de los tratados españoles unida a un análisis de las actividades realizadas muestran que la instrumentación matemática que manejaron, perfeccionaron y en ocasiones diseñaron los científicos e ingenieros al servicio de la corona hispánica estaba a la altura de los conocimientos que en esta materia tenían otros europeos a quienes la historia de la ciencia ha dedicado mayor atención en Europa.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

CATÁLOGO HISTÓRICO CRÍTICO DE LOS ASTROLABIOS EXISTENTES EN ESPAÑA, por S. García Franco; Madrid, 1945.

STORIA DELLE SCIENZE. GLI STRUMENTI, dirigido por G. L' E. Turner; Turín, 1991.

ASPECTOS DE LA CIENCIA APLICADA EN LA ESPAÑA DEL SIGLO DE ORO, por M. I. Vicente Maroto, M. Esteban Piñeiro. Junta de Castilla y León; Valladolid, 1991.

Grandes provincias ígneas

Estos extensos campos de lava dan testimonio de pulsos de actividad magmática muy poderosos, aunque breves en términos geológicos. Su formación puede haber instado cambios profundos en el ambiente del planeta

Millard F. Coffin y Olav Eldholm

En la investigación geofísica, llegar al lugar de observación no suele ser el menor de los problemas. Mientras navegaba con rumbo oeste, en medio de una tempestad, por el Pacífico Sur, el buque oceanográfico *Rig Seismic* de pabellón australiano fue azotado con tal fuerza, que el ancla se soltó y embistió contra el castillo de proa; las olas entraron por la proa e inundaron el barco. La avería retrasó el viaje hacia la planicie de Kerguelen, una región elevada de suelo oceánico justo al norte de la Antártida; la tripulación hubo de asegurar el ancla y tapar vías de agua. Cuando por fin la expedición, en la que se integraba uno de los autores (Coffin), llegó a Kerguelen, desplegó los instrumentos de análisis de las estructuras del fondo marino y empezó a tomar datos. La misión se proponía conocer el origen y evolución de esa enorme meseta submarina.

Estábamos en 1985. Contemporáneamente, en el otro hemisferio, el *JOIDES Resolution,* un laboratorio geológico flotante y buque de perforación, navegaba por el inquieto Atlántico Norte, con rumbo hacia la meseta oceánica de Vøring, a la altura de la costa noruega. La expedición, dirigida por Eldholm (el otro firmante del artículo) y por Jörn Thiede, del Centro de Investigación de Geología Marina de Kiel, se proponía abordar las estructuras geológicas que se forman en el proceso de separación de los continentes y nacimiento de un océano. Para asombro de muchos, extrajimos muestras de rocas ígneas situadas a casi un kilómetro de profundidad, bajo 300 metros de sedimentos no consolidados.

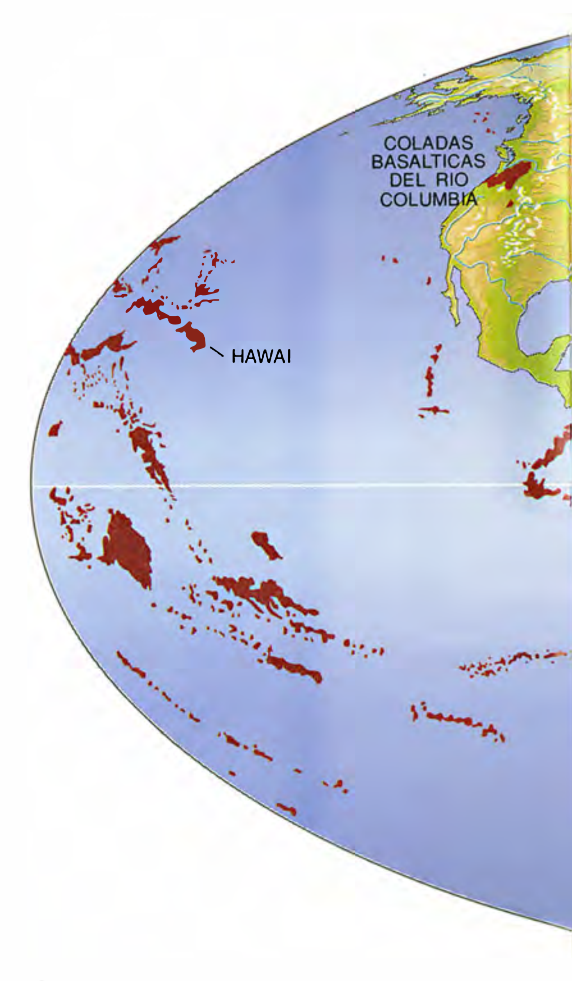
MILLARD F. COFFIN y OLAV ELDHOLM han colaborado durante los tres últimos años en un proyecto de estudio comprenhensivo de las formaciones ígneas gigantescas. Coffin, doctor en geología desde 1985 por Columbia, se halla adscrito al instituto de geofísica de la Universidad de Texas en Austin. Eldholm enseña geofísica marina en la Universidad de Oslo.

Aunque ubicadas a miles de kilómetros de distancia en ambientes geológicos diferentes, descubrimos estrechos parecidos en ambas mesetas. Sumados a los datos sísmicos y los derivados de perforaciones llevadas a cabo por otros investigadores, nuestros hallazgos han ayudado a demostrar que la meseta de Kerguelen y el margen continental volcánico de Noruega pertenecen a un tipo de ingentes manifestaciones magmáticas: las grandes provincias ígneas. Estas formaciones abarcan extensiones de millones de kilómetros cuadrados, por más que, en términos geológicos, diríase que se constituyeron con bastante rapidez.

Los espasmos de actividad eruptiva asociados con estas emisiones de lava pudieron haber dejado su sello en la química y circulación de los océanos y la atmósfera. Algunos de los cambios ambientales resultantes contribuyeron quizás a las extinciones en masa, incluida la de los dinosaurios; pero otros cambios fomentaron a buen seguro la diversidad biológica y el origen de nuevas especies.

La identificación de las grandes provincias ígneas ha obligado a replantearse las ideas establecidas sobre la estructura del interior de la Tierra. La teoría de la tectónica de placas da sobria cuenta de la actividad volcánica, lenta e incesante, que se desarrolla en las dorsales meso-oceánicas (donde se genera nueva corteza oceánica) y en la vecindad de las zonas de subducción (donde se hunden hacia el interior caliente de la Tierra secciones antiguas y densas de suelo oceánico). Ahora bien, en ese marco teórico no halla explicación satisfactoria la génesis de las abruptas explosiones que son necesarias para crear grandes provincias ígneas. Aunque la composición de las rocas que integran estas formaciones se parece, en general, a la característica de las lavas que emergen en las cordilleras meso-oceánicas, las provincias ígneas difieren en el contenido de sus elementos traza y en su mezcla de isótopos. Además, se abren incluso paso atravesando las plácidas placas litosféricas.

J. Tuzo Wilson, en los años sesenta, y W. Jason Morgan, más tarde, desarrollaron una hipótesis que arrojó



1. GRANDES PROVINCIAS IGNEAS (*en rojo*), ampliamente repartidas por todo el globo. Los puntos señalan los lugares donde los

luz sobre el fenómeno. Propusieron que el manto terrestre, vasta zona situada entre la corteza y el núcleo, sigue dos patrones de circulación.

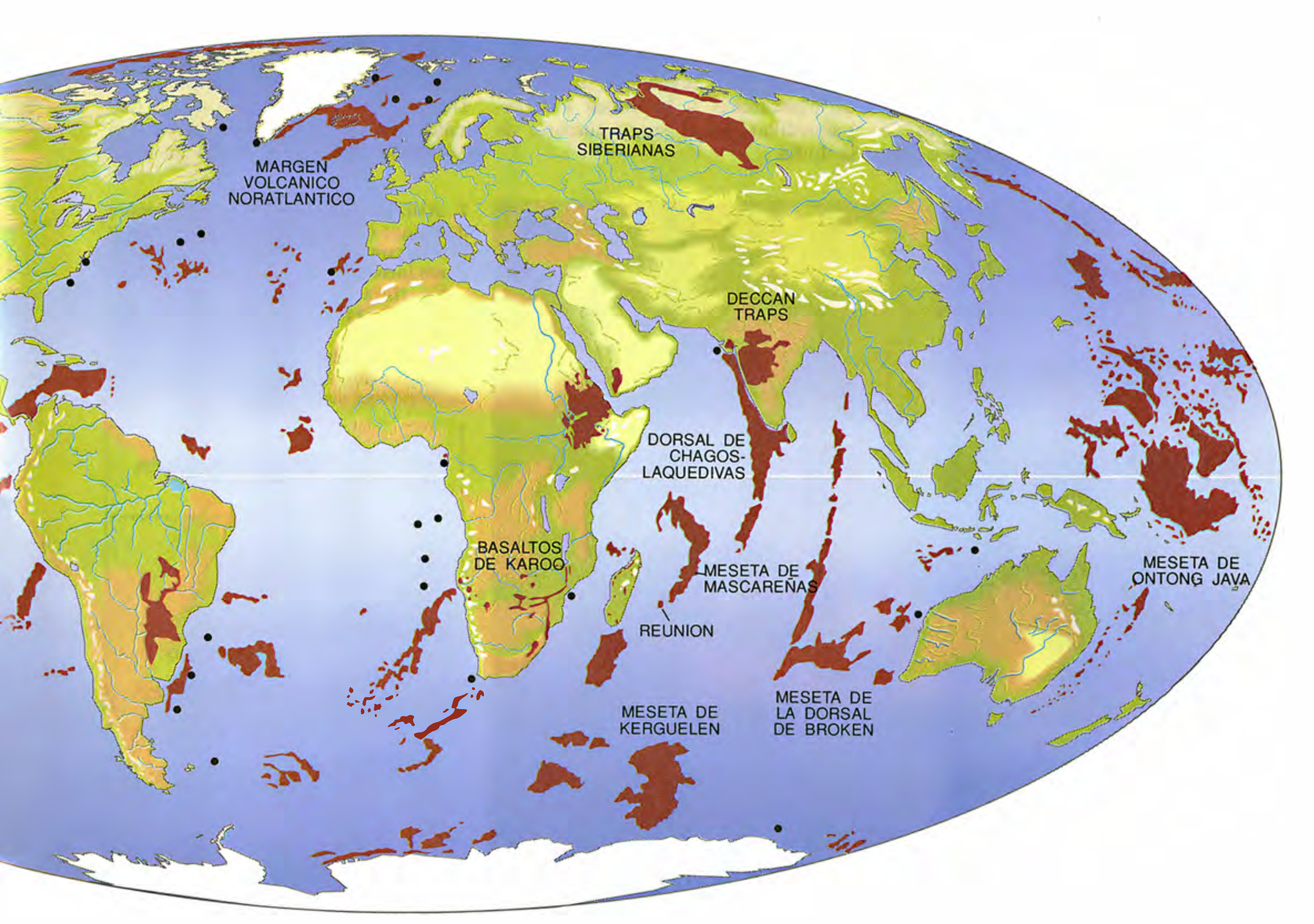
El modelo predominante consiste en la convección a gran escala que empuja suavemente las placas por la superficie y causa la deriva de los continentes. Pero una décima parte del calor que se escapa del manto lo hace a través de estrechos penachos de material, profundamente enraizados, cuya temperatura es superior a la media y que ascienden a través del manto. Cuando llega a la base de la litosfera, el penacho (o pluma) sufre descompresión y se funde parcialmente produciendo un chorro emergente de magma y una región persistente de actividad volcánica, un "punto caliente". Parte de ese magma puede brotar a modo de río de lava. En oposición a la deriva de los continentes y la expansión de las dorsales meso-oceánicas, procesos lentos y uniformes, la salida a la superficie de las plumas del manto se produce de forma errática y episódica.

Todos los modelos de estructura interna de la Tierra parten de inferencias, ya que hasta los sondeos más profundos no superan los 10 kilómetros. De ahí el enorme interés de los estudios directos e indirectos de las grandes regiones ígneas para conocer mejor la naturaleza de los penachos del manto y la manera en que éstos inciden en las condiciones de la superficie terrestre.

El dato fundamental relativo a esas provincias concierne a su constitución: están formadas por basalto, una roca común rica en hierro y magnesio. Las grandes manifestaciones ígneas que aparecen en pleno continente, donde los geólogos pueden recoger fácilmente muestras y determinar su composición, se denominan coladas o derrames basálticos continentales. Cuando las provincias ígneas yacen en los bordes de los continentes, se habla de márgenes volcánicos pasivos; si se localizan en medio del océano, se llaman mesetas o planicies oceánicas.

Los geólogos descubrieron la existencia de coladas continentales a finales del siglo XIX, al comprobar que varias construcciones volcánicas dispersas constituían, en realidad, coladas de lava basáltica conectadas. De éstas, una de las más espectaculares es la de Deccan Traps, en el centro-oeste de la India. (*Trap*, en holandés, significa "escalera"; y se aplica aquí por la morfología escalonada de las lavas erosionadas.) Son estructuras similares los basaltos del río Columbia en el noroeste americano, las efusiones volcánicas noratlánticas de las islas Británicas, las islas Feroe y Groenlandia, así como los basaltos sudafricanos del Karoo, por citar algunos. En la colada, las capas de lava se superponen hasta constituir varios kilómetros de grosor. Cada emisión puede contener varios miles de kilómetros cúbicos de roca y cubrir cientos de kilómetros de superficie.

La inaccesibilidad de las provincias ígneas submarinas impidió que los geólogos se percataran, hasta hace



estudios de reflexión sísmica parecen revelar actividad volcánica antigua a lo largo de los márgenes continentales. La meseta de Ontong Java abarca unos dos millones de kilómetros cuadrados. La investigación de esas formaciones magmáticas arroja nueva luz sobre el funcionamiento de las entrañas de la Tierra y su posible repercusión en las condiciones de la superficie.

poco, de la semejanza entre aquéllas y las coladas basálticas continentales. En 1981, Karl Hinz sugirió, basándose en su análisis de reflexión de ondas sísmicas, que los bordes sumergidos de muchos continentes poseían extensas coladas de lava estratificadas. Con los años se han ido refinando los datos sísmicos, que parecen corroborar la conclusión de Hinz. Las rocas ígneas muestreadas en proyectos de perforación de los márgenes continentales de Irlanda y Noruega confirman el origen volcánico de las estructuras observadas en los registros sísmicos.

Los estudios sísmicos efectuados sobre la meseta de Kerguelen aportaron pruebas convincentes de que las planicies oceánicas están constituidas primordialmente por rocas volcánicas. La misión del *JOIDES Resolution* extrajo muestras directas de dos inmensas mesetas oceánicas: Kerguelen en 1988 y Ontong Java en 1990. Las muestras son de roca basáltica, similar a la encontrada en los derrames basálticos continentales.

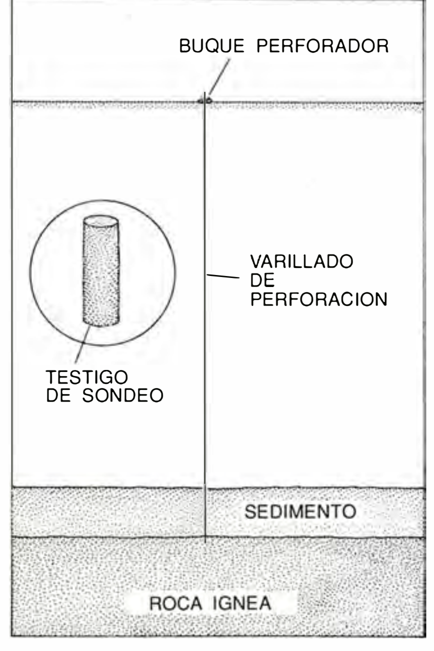
Los geólogos se preguntan por el mecanismo generador de tamañas formaciones volcánicas. Para responder a esa cuestión poseemos todavía escasa información básica, esto es, la que se refiere a los volúmenes totales de lava y roca intrusiva en las provincias ígneas y su tasa de formación. En el continente, los geólogos miden directamente el área ocupada por los derrames basálticos, pero sólo pueden inferir su profundidad. La corteza subyacente a los continentes presenta un espesor medio de 35 kilómetros, y sólo las partes superiores son accesibles a la exploración. En las profundidades oceánicas, la tarea resulta mucho más difícil. Recoger muestras de las capas superficiales de la corteza oceánica requiere el concurso de un buque perforador costoso.

El transcurso del tiempo borra el alcance exacto de estructuras volcánicas antiguas. Las provincias ígneas más antiguas se hallan a menudo intensamente erosionadas, por lo que se nos ofrecen desfiguradas y recortadas en su tamaño. A este propósito, John J. Mahoney estima que Deccan Traps cubría originalmente un área tres veces mayor; además, en los 65 millones de años transcurridos desde la formación de esas terrazas, el fondo oceánico ha dispersado en su expansión secciones de lavas originales hacia las islas Seychelles, la meseta de Mascareñas y la dorsal Chagos-Laquedivas, en el sur y suroeste de la India.

De manera parecida, las fuerzas del cambio han remodelado los márgenes volcánicos submarinos y las mesetas oceánicas. Las muestras de sondeo y los registros de reflexión sísmica de la provincia ígnea situada a lo largo del margen continental noruego y de la meseta de Kerguelen demuestran que, cuando emergieron esas formaciones, se alzaron sobre el nivel del mar, para irse hundiendo gradualmente hasta su ubicación actual en aguas profundas. A tenor de lo calculado por Coffin, las mesetas de Kerguelen y de Broken, junto con la mayoría de las mesetas y cordilleras del océano Indico, se conformaron por encima del nivel del mar y permanecieron allí durante 50 millones de años, un intervalo suficiente para sufrir los efectos de la erosión.

Pese a la escasez de datos y a las transformaciones físicas experimentadas por las grandes regiones ígneas, hemos acotado las zonas originales cubiertas de lava en cinco de las áreas mejor estudiadas de estas singulares formaciones: las mesetas oceánicas de Ontong Java, Kerguelen y Broken; los márgenes volcánicos noratlánticos, y los derrames basálticos continentales de Deccan y río Columbia. La menor (basaltos del río Columbia) abarca una extensión superior al estado de Nue-





2. *JOIDES RESOLUTION* es el nombre del buque oceanográfico en que se apoya el Programa de Perforación Oceánica. El barco incorpora una máquina de sondeos que perfora los sedimentos y extrae testigos de hasta dos kilómetros de profundidad. Gracias a ello, podemos analizar directamente rocas ígneas de los márgenes continentales submarinos y de mesetas oceánicas sumergidas.

va York; la mayor (planicie de Ontong Java) viene a ser dos tercios el tamaño de Australia. Para calcular el área y volumen de grandes regiones ígneas, hay que examinar prototipos actuales de provincias ígneas gigantes.

Ninguna región volcánica que esté activa se aproxima, ni de lejos, a la magnitud de las grandes provincias ígneas extintas. Los puntos calientes que registran ahora mayor actividad (islas Hawai e isla de la Reunión, situada ésta frente a Madagascar) cubren un área de la corteza terrestre de sólo una quinta parte del tamaño de los basaltos del río Columbia. Lo que no impide que el estudio de la estructura cortical subyacente a Hawai facilite el conocimiento del patrón genérico que rige en todos los puntos calientes volcánicos.

En 1982, Anthony B. Watts y Uri S. Brink obtuvieron, con sus colaboradores, datos sísmicos registrando ondas sonoras, provocadas artificialmente, que se reflejaban y refractaban bajo los montes submarinos e islas de Hawai. La velocidad de esas ondas depende de las propiedades físicas de la roca (densidad y constantes elásticas); donde esas magnitudes cambien, las ondas sísmicas alterarán su trayectoria. El análisis sísmico revela que las islas Hawai se fueron gestando conforme el magma basáltico se iba introduciendo hasta acumularse sobre la corteza oceánica preexistente.

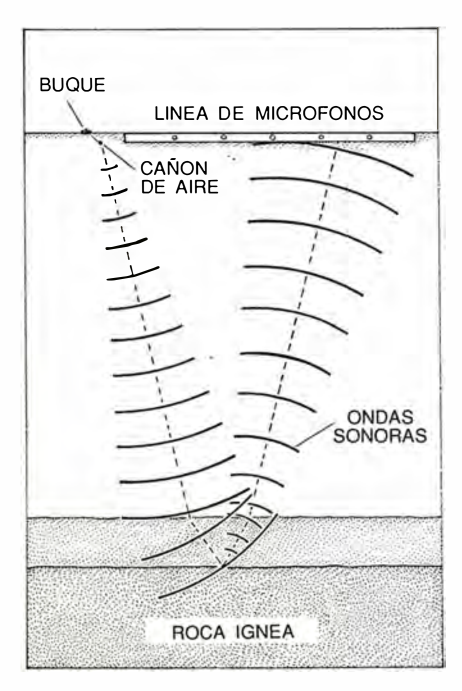
Es manifiesto que esas lavas superficiales no agotan todo el material asociado a la formación de las islas. Bajo islas y montañas submarinas yace una zona rocosa anómala que se caracteriza por la velocidad con que la atraviesan las ondas de compresión; se supone que esta masa de roca procede de la misma fuente del manto que las islas y las montañas marinas. No podemos todavía determinar cuánta materia ígnea nueva se incorporó a la corteza oceánica preexistente durante la constitución de las islas. Así pues, deberá considerarse mínimo el volumen de material derivado de los penachos del manto que se calcule contenido en la cadena hawaiana.

Pudimos, sin embargo, establecer una relación básica entre la estructura proporcionada por los datos relativos a la velocidad sísmica (y otros datos geofísicos) y el volumen total de material involucrado en las Hawai. Ello nos permitió tomar el archipiélago de modelo para deducir la distribución de material volcánico en diversas macroprovincias ígneas antiguas. Según nuestros cálculos, una provincia pequeña, así la del río Columbia, vendría a constar de 1,3 millones de kilómetros cúbicos de roca. La gigantesca Ontong Java contiene por lo menos 36 millones de kilómetros cúbicos de roca ígnea, suficiente como para enterrar los EE.UU. bajo 5 kilómetros de basalto.

¿Cuánto tardaron en formarse las provincias ígneas? ¿Se fueron acumulando lenta y uniformemente durante decenas de millones de años, a la manera en que se crea nueva corteza oceánica en las cordilleras mesooceánicas? ¿Emergieron, quizás, a través de episodios de erupción volcánica que arrojaron súbitamente al aire y al agua gases y fragmentos de roca, o transformaron de repente la geología de vastas extensiones terrestres?

La investigación ha puesto particular empeño en responder a estas cuestiones a propósito de Deccan Traps. Estos basaltos volcánicos han merecido especial atención porque emergieron hace 65 millones de años, contemporáneamente a un episodio notable de extinción en masa ocurrido en las postrimerías del período Cretácico, y tuvieron quizá parte en ese acontecimiento. Robert A. Duncan, Vincent E. Courtillot, Didier Vandamme y otros han acometido la datación radiométrica y análisis magnéticos de algunas

3. *RIG SEISMIC*, buque oceoanográfico del Servicio Geológico de Australia. Recoge información sísmica relativa al fondo oceánico. Mediante un cañón de aire, se crean ondas sonoras que se reflejan en la corteza oceánica. Los micrófonos submarinos captan las ondas reflejadas, registradas a bordo. En uno de esos registros se evidencia la estructura ígnea que subyace bajo la meseta de Kerguelen.





MESETA DE KERGUELEN

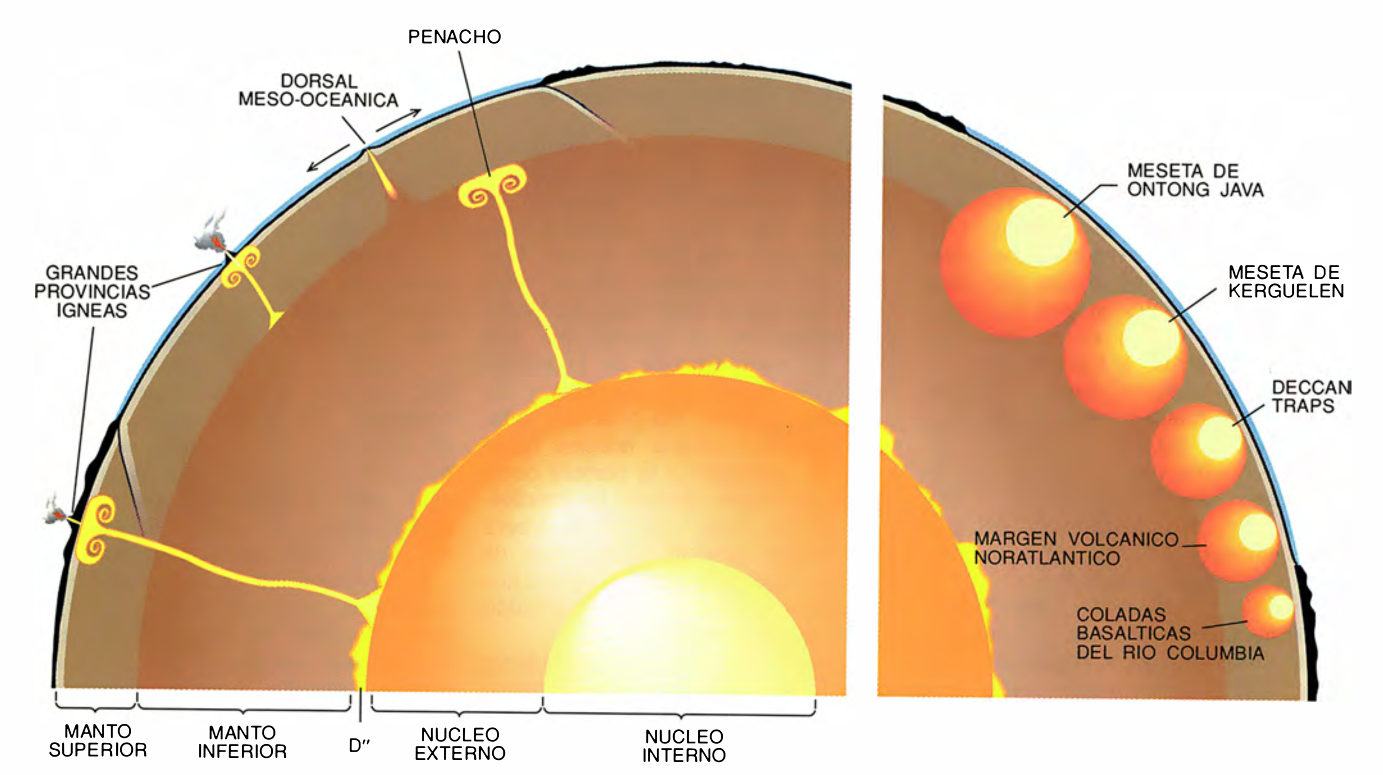
TIEMPO DE RECEPCION DE LAS ONDAS (SEGUNDOS)

3

4

5

10 KILOMETROS



4. LOS PENACHOS ASCENDENTES de materiales a altas temperaturas atraviesan el manto terrestre. Allí donde la cabeza del penacho alcanza la superficie, se forma una gran provincia ígnea (*izquierda*). Los penachos, o plumas, nacen probablemente en las capas fronterizas entre el núcleo y el manto (la región D″) y en la zona entre el manto superior y el inferior. Los penachos creadores de las provincias ígneas más voluminosos eran tan enormes que debieron haberse originado, al menos en parte, en el manto inferior; lo más probable, en la zona D″. Las esferas de la derecha representan los diámetros mínimo (*blanco*) y máximo (*naranja*) que se han deducido para las plumas asociadas con las cinco provincias principales.

muestras de Deccan Traps. Según sus resultados, la mayoría de las lavas erupcionaron en un lapso temporal inferior al millón de años. Con métodos parecidos, Ajoy K. Baksi halló que la mayor parte de los basaltos del río Columbia fue arrojada en un intervalo de un millón y medio de años.

Los geólogos tienen pocas muestras directas en las que apoyarse para juzgar la edad y ritmo de formación de los márgenes volcánicos submarinos y las mesetas oceánicas. Las escasas pruebas disponibles señalan que las provincias ígneas submarinas se formaron con pareja celeridad que las continentales. Eldholm calcula que la masa de la provincia volcánica noratlántica tardó tres millones de años en conformarse, si no menos. Mahoney y el grupo de John A. Tarduno llegaron a la conclusión de que la provincia de Ontong Java se forjó en menos de tres millones de años. Nuestros análisis geocronológicos para determinar la edad de rocas, efectuados bajo la dirección de Hugh Davies y Hubert Whitechurch, indican que la meseta de Kerguelen se constituyó en un intervalo de 4,5 millones de años.

Desde un punto de vista geológico, las macroprovincias ígneas emergieron en un intervalo temporal bastante corto; piénsese, por mor de comparación, que las montañas Rocosas tardaron más de 40 millones de años en constituirse, y 70 millones por lo menos duró la formación de la cadena de las islas Hawai y los montes Emperador, submarinos. Además, buena parte de la actividad volcánica asociada con las provincias ígneas podría haberse desarrollado en cortos episodios violentos intercalados por otros de relativa quietud más dilatados.

Recogidos los datos sobre el volumen total de las principales regiones ígneas y su ritmo de formación, podíamos entonces inferir la magnitud de las fuerzas volcánicas que las originaron. Las erupciones que crearon la provincia de Ontong Java arrojaron de 12 a 15 kilómetros cúbicos de lava por año; el vulcanismo implicado en Deccan expulsó de dos a ocho kilómetros cúbicos anuales. Si admitimos que la creación de provincias ígneas, lo mismo que otros procesos eruptivos, se produce a rachas, el ritmo de generación de corteza pudiera haberse acelerado durante ciertos años. A modo de punto de referencia: Roger L. Larson estima que la red global de dorsales meso-oceánicas ha venido produciendo de 16 a 26 kilómetros cúbicos de corteza anuales a lo largo de los últimos 150 millones de años; quiere ello decir que las distintas provincias ígneas han generado corteza nueva a una tasa equiparable, si no mayor, a la producida por la expansión del suelo oceánico.

Comparada con la actividad desarrollada en el interior del planeta, la rapidez con que se gestaron las grandes provincias ígneas fue tal, que forzosamente procedían de ciertas fuentes, separadas entre sí. Sabiendo el volumen de roca basáltica encerrada en esas provincias, podemos calibrar las dimensiones de los penachos calientes del manto que las originaron. Sólo una fracción de los materiales que componen esas plumas se funde y alcanza la corteza, fracción que presumimos menor cuanto mayor es la profundidad de su arranque, donde las altísimas presiones reinantes mantienen en estado sólido las rocas del manto. Así pues, bajo la gruesa litosfera continental debe producirse menor fusión que bajo la litosfera oceánica, más delgada. Stephen M. Eggins y Shen-su calculan que la porción basáltica del penacho (la responsable del vulcanismo de superficie y de las intrusiones ígneas subsuperficiales) representa del 5 al 30 por ciento del volumen total del penacho.

Los autores se sirvieron de esas

cifras para deducir los diámetros de las anomalías térmicas del manto asociadas con las cinco provincias mejor estudiadas. Por razones de simplicidad, supusimos esféricos los chorros, pues se trata de la forma que representa el transporte más eficiente de materiales y permite, por ende, el lento ascenso de la pluma a través de las entrañas de la Tierra. De acuerdo con nuestro análisis, Ontong Java procede de un penacho de 600 a 1400 kilómetros de diámetro.

Esas proporciones revisten especial interés para los geólogos. Señalan que los grandes penachos portan cierta porción, al menos, de materiales del manto inferior, situado a más de 670 kilómetros de la superficie. A esa profundidad, la velocidad de las ondas sísmicas cambia de repente, por culpa probablemente de la textura mineral de las rocas del manto. El problema de si existe mezcla de manto superior y manto inferior o si se comportan como sistemas independientes que circulan por separado constituye una cuestión disputada en geofísica.

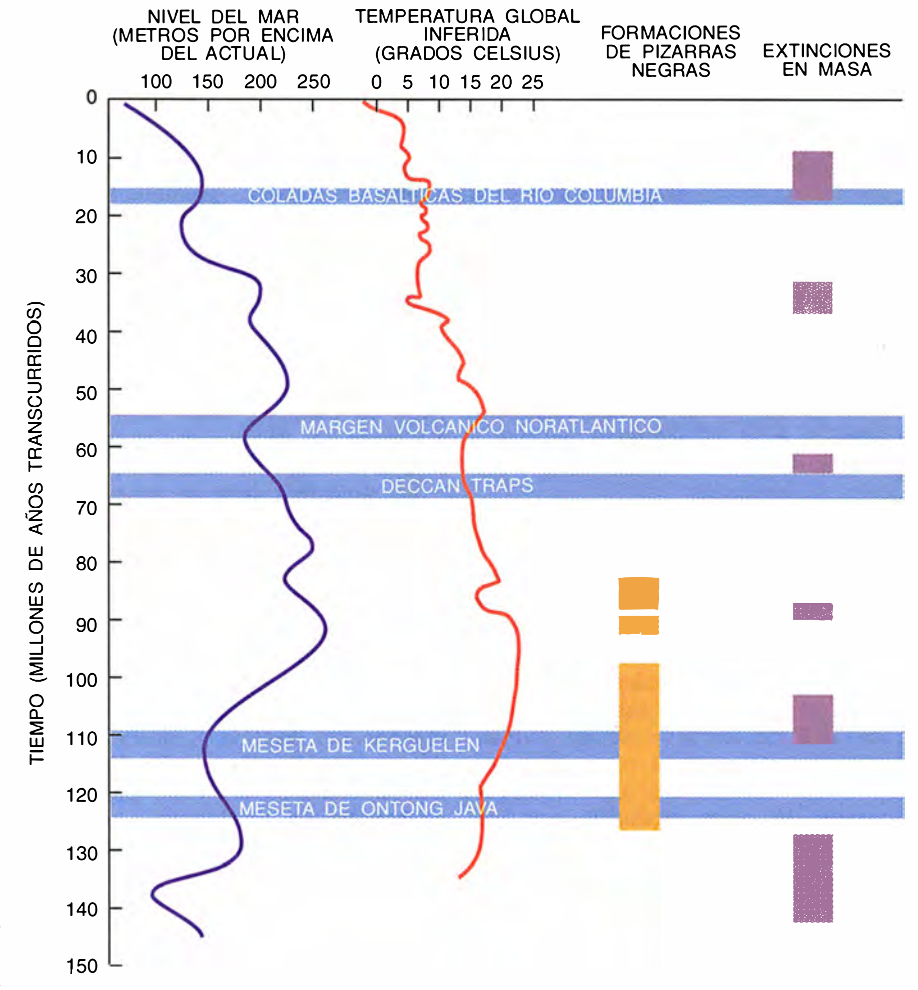
Nuestros trabajos apoyan los modelos que permiten cierta interacción entre ambas secciones del manto. Opinamos que los penachos mayores brotan del manto inferior, verosímilmente de D″, una región dotada de insólitas propiedades sísmicas que descansa sobre el mismo núcleo; los menores nacerían a unos 670 kilómetros de profundidad, en la zona de transición entre el manto superior y el inferior.

Con independencia de su punto de origen, las características y efectos de las plumas en la superficie guardan relación con la temperatura, la composición y el estado físico de los materiales que encuentren bajo la litosfera. Combinados con la resistencia local de la litosfera, esos factores determinan el volumen, secuencia temporal y lugar de la erupción en la superficie. Cuando los penachos se forman bajo masas continentales, contribuyen quizás al desgarro de los continentes en un punto débil e inducen así la formación de extensas estructuras volcánicas a lo largo de los márgenes de masas continentales falladas. Bajo determinadas circunstancias, la pluma emergente podría perforar la gruesa región central de los bloques continentales y producir una colada de basalto continental.

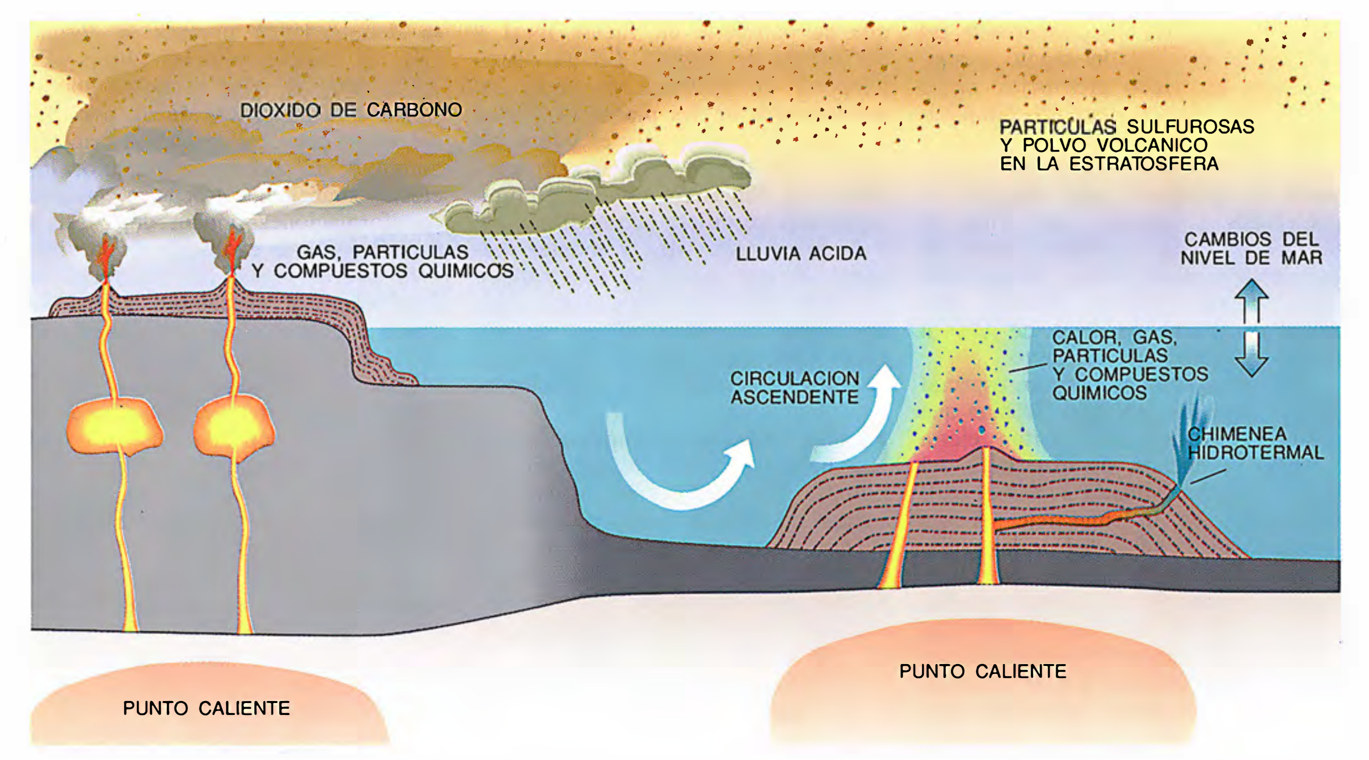
¿Qué ocurre si el penacho emerge, en su ascenso, por el suelo marino? Que podría originar una meseta oceánica. Los experimentos de laboratorio avalan la hipótesis de la existencia, bajo la cabeza esférica del penacho, de una cola de material incandescente que se convierte en fuente local y perdurable de magma. En un marco temporal de millones de años, los movimientos de las placas desplazan el suelo océanico hasta el punto caliente. Allí donde la lava sale arrojada a la superficie, se va configurando una cordillera submarina lineal o un rosario de islas y montes marinos; de ese modo se desarrollaría la cadena Hawaiana-Emperador, aunque sigue envuelto en el misterio cómo pudo durar más de 70 millones de años la actividad de un penacho.

Como demostró la erupción del Pinatubo en 1991, en las islas Filipinas, las explosiones volcánicas atentan gravemente contra el ambiente, aunque sean moderadas. Pero esos episodios geológicos son contracciones anecdóticas comparadas con las convulsiones de actividad magmática que se desencadenan durante la formación de macroprovincias ígneas. En 1972, Peter R. Vogt proponía que la salida a la superficie de un penacho del manto provocaría cambios físicos y químicos de alcance planetario; los efectos ambientales asociados con esas transformaciones podían dejar sentir su influjo en la evolución de la vida.

El interés actual por el efecto de invernadero y el cambio global ha traído a primer plano la hipótesis de Vogt. En esa línea, Stephen Self y Michael R. Rampino señalan que el impacto ambiental de una macroprovincia ígnea depende en parte del lugar de su formación: si en el continente o en el océano. Las mesetas oceánicas y los márgenes volcánicos modifican la geometría de las cuencas y alteran el nivel del mar. Nosotros calculamos que la acumulación de material en la meseta de Ontong Java



5. ENTRE LOS EFECTOS AMBIENTALES ejercidos por la erupción de una macroprovincia se incluyen las fluctuaciones del nivel del mar. Una actividad volcánica poderosa puede condicionar la química y la circulación de la atmósfera y los océanos, con sus secuelas en la evolución de los organismos. Los volcanes arrojan dióxido de carbono, que puede contribuir al efecto de invernadero; las temperaturas realzadas promueven la formación de pizarras negras, en parte porque potencian la producción de biomasa global. Por el contrario, varias extinciones masivas acaecidas durante los últimos 150 millones de años coinciden con la aparición de las grandes provincias ígneas, sugiriendo una relación causal.



6. EFECTOS FISICOS Y QUIMICOS asociados con la aparición de las macroprovincias ígneas. Los volcanes emiten dióxido de carbono, que eleva la temperatura global. Las partículas sulfurosas y el polvo volcánico de la estratosfera podrían producir lluvia ácida y bloquear el paso de la luz solar. Los metales pesados y otros productos químicos emitidos durante las erupciones podrían asimismo alterar la composición de la tierra, el aire y el agua. Los cambios topográficos asociados con un vulcanismo generalizado modificarían la circulación oceánica y el nivel del mar; el calor y la actividad hidrotermal traen agua profunda a la superficie, provocando transformaciones adicionales de las condiciones submarinas.

elevó el nivel del mar unos 10 metros. Las mesetas oceánicas y los márgenes volcánicos podrían bloquear o restringir la circulación hasta el extremo de influir en la circulación global, en la erosión y en la sedimentación, sobre todo si la actividad volcánica se manifiesta en un punto clave entre cuencas oceánicas.

Porque su densidad y masa superan de lejos las de la atmósfera, los océanos encierran también una capacidad mayor de absorber y diluir los gases y el calor, cualidad ésta que tiende a amortiguar las consecuencias de las erupciones volcánicas. Por otra parte, el vulcanismo submarino y la actividad hidrotermal asociada podrían lixiviar metales traza como el arsénico, que son tóxicos para los organismos. El calor producido por las erupciones submarinas induce el ascenso de las aguas profundas hacia la superficie, alterando la circulación de las aguas superficiales y perturbando los organismos que viven allí.

El dióxido de carbono emitido en una zona volcánica submarina se dispersa por el océano, fenómeno que eleva la alcalinidad del agua, incide en la vida marina e influye en el clima. Si el incremento de la concentración de dióxido de carbono provoca un calentamiento global, la circulación oceánica se torna más lenta, transportando entonces menos oxígeno disuelto. Las aguas desprovistas de oxígeno pueden contribuir a la formación de pizarras negras ricas en carbono, como demostraron Seymour O. Schlanger, Michael A. Arthur y Hugh C. Jenkyns.

La atmósfera debe de haber absorbido una emisión general de dióxido de carbono hace unos 120 millones de años, durante la fase de mayor actividad volcánica. Larson supone que una inestabilidad térmica masiva en la capa D″ inició las superplumas que abastecieron las mesetas de Ontong Java y Kerguelen y varias otras menores del Pacífico. Kenneth G. Caldeira y Rampino han realizado modelos informáticos del ciclo geoquímico basados en sus hipótesis sobre la cantidad de dióxido de carbono presente en la atmósfera durante esa era; modelos en virtud de los cuales infieren que el promedio de temperaturas mundial era de 7,6 grados C a 12,5 grados C más altas que las medias actuales, si se tienen en cuenta la diferencia de geografía y mayor nivel del mar en aquel entonces.

Cuando las erupciones volcánicas tienen lugar en tierra firme, afectan directamente a las condiciones físicas y químicas de la atmósfera. Alan R. Huffman calcula que una sola colada basáltica que genere 1000 kilómetros cúbicos de lava (el volumen de una colada típica de la provincia del río Columbia) emite 16 billones de kilogramos de dióxido de carbono, tres billones de kilogramos de azufre y 30.000 millones de kilogramos de halógenos. Los millares de episodios de esta naturaleza que deben acontecer durante la génesis de una sola macroprovincia ígnea modificarían la atmósfera de una manera tal que convertirían en irrisorios los efectos de los contaminantes modernos producidos por el hombre.

Según Rampino y Self, las erupciones explosivas de rocas de sílice suelen transportar partículas sulfurosas hacia la estrosfera, donde se transforman en gotículas de ácido sulfúrico. Las lavas basálticas emiten unas diez veces más azufre por unidad de volumen que las lavas ricas en sílice; el equipo de Charles B. Officer ha llegado a la conclusión según la cual, si los gases y partículas producidos durante las erupciones de basalto fueran arrojados a la estratosfera, desencadenarían al poco lluvia ácida, oscurecimiento general y enfriamiento global. Richard B. Stothers sostiene, con otros, la hipótesis de que los potentes manantiales de lava y la vigorosa convección atmosférica que se desarrolla sobre las chimeneas erup-

tivas de las coladas basálticas continentales podrían proporcionar la fuerza de impulso ascendente que se necesita para inyectar el material en la estratosfera.

La violenta erupción del Lakagigar en 1783-84 ilustra los potenciales efectos destructivos del vulcanismo de coladas basálticas. Aunque ese volcán islandés arrojó sólo 15 kilómetros cúbicos de lava, las temperaturas locales disminuyeron notablemente en los años siguientes. Alrededor de las tres cuartas partes de la cabaña animal de Islandia murió, por culpa a buen seguro de la degradación del clima y de las emisiones de gas ácido; el hambre resultante mató a una cuarta parte de la población. Durante muchos meses después de la erupción, velos de suciedad, niebla y brumas aparecieron sobre Europa y áreas adyacentes de Asia y Africa.

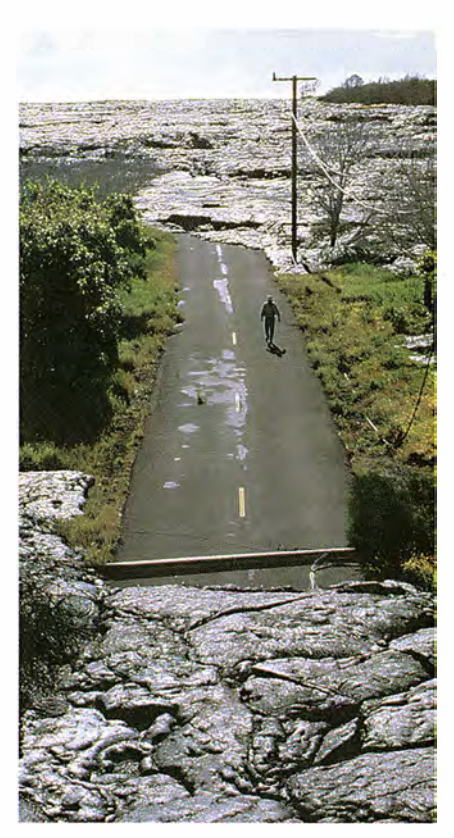
Comienzan a percibirse indicios claros de la responsabilidad directa de los cambios ambientales, instados por el vulcanismo de grandes coladas basálticas, en las extinciones en masa. La extinción más drástica aconteció hace 248 millones de años, cuando se formaron los Traps siberianos. Pereció entonces un 95 por ciento de todas las especies marinas; los múltiples nichos ecológicos que quedaron disponibles favorecieron la aparición de los dinosaurios.

Las repercusiones biológicas de la erupción de las macroprovincias ígneas depende quizás en parte del estado del entorno global en ese momento. Cuando el ambiente sufre ya las tensiones de otros factores, la actividad volcánica puede desencadenar rápidos cambios de orden climático, oceanográfico y biótico; en un medio más vigoroso, muy pocos efectos dejarán su huella en el registro geológico.

No cabe, pues, sorprenderse de que Ontong Java, la mayor provincia ígnea, no produjera apenas extinciones detectables. Todo lo contrario: su formación coincide con la sedimentación de pizarras negras, que bien pudiera constituir un índice de mayor actividad biológica. En nuestra opinión, los efectos deletéreos asociados con la aparición de Ontong Java son mínimos en parte porque la erupción ocurrió bajo el agua, según se desprende de la investigación dirigida por Loren Kroenke y Wolfgang H. Berger. También sospechamos que el ambiente de hace 120 millones de años se encontraba en un estado de adaptabilidad a los cambios, aunque tal suposición es difícil de probar. Sin embargo, la formación de Kerguelen y Broken Ridge, hace 110 millones de años, coincidió con una extinción en masa además de con una sedimentación importante de pizarras negras.

Las erupciones que construyeron los Deccan Traps y el vulcanismo simultáneo a lo largo de los márgenes occidentales de la India y de las Seychelles, así como en la meseta de Mascareñas, sucedieron hace unos 65 millones de años: coincidieron en el tiempo con la extinción de casi la mitad de todas las especies, entre ellas los dinosaurios. Se debate si esos cambios hay que atribuirlos al impacto de un asteroide imponente o a explicaciones más terrestres. Aun en el caso de que un asteroide fuera el agente fundamental de esta extinción, las erupciones del Deccan podrían haber contribuido a la degradación del entorno, lo que acentuaría las repercusiones del impacto.

Otro cambio significativo del medio, aunque menos célebre, aconteció diez millones de años después de la desaparición de los dinosaurios, durante la formación de los márgenes volcánicos noratlánticos. En esa época, se extiguieron muchos foraminíferos del fondo oceánico y mamíferos terrestres; la actividad hidrotermal era entonces muy alta. David K. Rea y Ellen Thomas encuentran indicios de transformaciones importantes de la circulación de las aguas profundas y de la propia atmosférica.



7. COLADA DE LAVA del volcán Kilauea, en Hawai. Es sólo una muestra de la magnitud e impacto ambiental de las coladas incorporadas en las macroprovincias ígneas.

El análisis de los isótopos de oxígeno encontrados en foraminíferos indica que hace 55 millones de años, durante el Eoceno temprano, las temperaturas oceánicas fueron las más cálidas de los últimos 70 millones de años. Eldholm y Thomas han propuesto recientemente que la superficie templada del mar, en el Eoceno temprano, podía deberse a la purificación de dióxido de carbono durante las erupciones acaecidas a lo largo de los márgenes volcánicos noratlánticos. Capas de cenizas que datan de hace 55 millones de años cubren grandes regiones noroccidentales de Europa, confirmando la violencia del vulcanismo. La elevación de la temperatura atmosférica podría haber ocasionado la formación de una capa de aguas cálidas en la superficie de los océanos de latitudes altas; ese estrato cálido se opondría a la mezcla con las capas subyacentes de aguas más frías. Los consiguientes cambios en la circulación de aguas profundas pudieron haber resultado fatales para muchas especies bentónicas.

La propia colada basáltica del río Columbia coincidió con una extinción en masa, ocurrida hace 16 millones de años. Fue por entonces cuando la Tierra empezó a experimentar el ciclo de épocas glaciales en el que nos hallamos inmersos, como señala Maureen E. Raymo. Quizás el ambiente estaba ya tan degradado que bastó una erupción moderada para producir efectos de semejante alcance.

Aunque los geólogos sólo han arañado, literal y figuradamente, la superficie de las grandes provincias ígneas, sabemos ya que encierran información clave para conocer la actividad interna de la Tierra y las causas naturales de cambios globales.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

CONTINENTAL FLOOD BASALTS. Dirigido por J. D. Macdougall. Kluwer, 1988.

GEOLOGICAL CONSEQUENCES OF SUPERPLUMES. Roger L. Larson en *Geology*, vol. 19, nº. 10, págs. 963-966; octubre de 1991.

MAGMATISM AND THE CAUSES OF CONTINENTAL BREAK-UP. Dirigido por B. C. Storey, T. Alabaster y R. J. Pankhurst. Publicación epecial, nº. 68. Geological Society of London, 1992.

LARGE IGNEOUS PROVINCES: CRUSTAL STRUCTURE, DIMENSIONS, AND EXTERNAL CONSEQUENCES. M. F. Coffin y O. Eldholm en *Reviews of Geophysics* (en prensa).

Módulos móviles en la evolución de las proteínas

Aunque desconocemos los mecanismos en virtud de los cuales estas unidades proteínicas se dispersan y se multiplican, la presencia de un patrón en el curso evolutivo se hace cada vez más patente

Russell F. Doolittle y Peer Bork

Biólogos moleculares y bioquímicos han ido descubriendo, a lo largo de los últimos decenios, que muchas proteínas están formadas por dominios, es decir, por secuencias discretas de aminoácidos. Tales dominios presentan, en numerosísimos casos, funciones bien definidas que contribuyen a la actividad general de la proteína. Algunas de esas unidades modulares saltan frecuentemente de un punto a otro dentro de una misma proteína y de una a otra proteína, en el curso de la evolución. La movilidad evolutiva de los módulos no se circunscribe a los saltos operados en el material genético de una misma especie; en ciertos casos, los bloques en cuestión cruzan la barrera interespecífica, para viajar, por ejemplo, de una célula animal a una bacteria.

Ante el hallazgo de una estructura, asimismo compartimentada, en las regiones de genes que determinan proteínas, muchos biólogos están convencidos de que, en última instancia, tal arquitectura refleja un mismo fenómeno subyacente. Y suponen que cada región con información genética codificadora se corresponde con un rasgo estructural de una proteína. Pero nosotros, y quienes colaboran con nosotros, sostenemos un punto de vista distinto: creemos que los datos disponibles apoyan la idea de que la subdivisión de los genes en distintas zonas codificantes constituye un desarrollo mucho más reciente que lo que cabe esperar de un mecanismo estrictamente evolutivo.

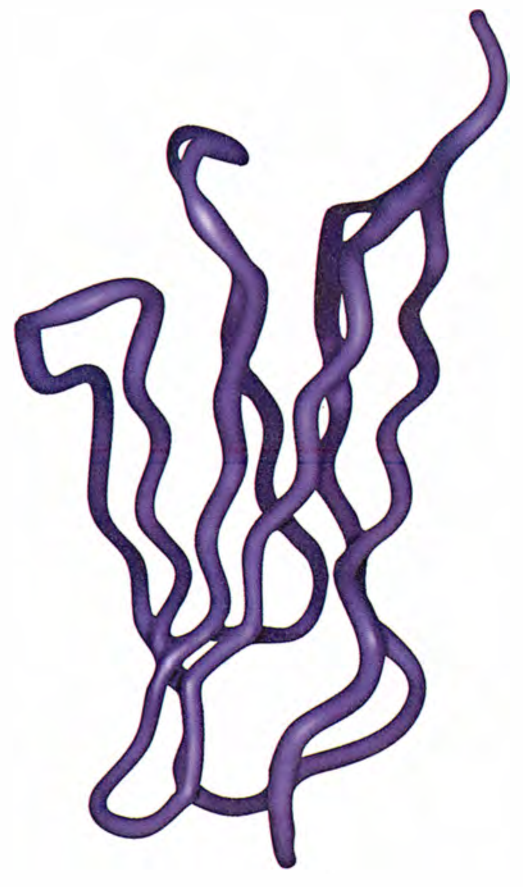
Las proteínas son cadenas largas de unas moléculas pequeñas denominadas aminoácidos. Veinte aminoácidos diferentes, cada uno con su propia forma y estructura química, constituyen todas las proteínas que se encuentran en la naturaleza. Las propiedades de una proteína dependen de la naturaleza de los aminoácidos utilizados en su construcción, y en especial del orden en que están encadenados. Y lo que es más destacable, la secuencia de los aminoácidos determina el modo de plegamiento de la proteína para dar una estructura tridimensional funcional, o activa.

La longitud de una secuencia desempeña un papel importante en esa determinación. Las cadenas polipeptídicas pueden constar de millares de aminoácidos. (Hasta la fecha, la cifra récord pertenece a la titina, una proteína del músculo que contiene 30.000 aminoácidos.) Las cadenas cortas, sin embargo, no se extienden lo suficiente para tener uniones intramoleculares que les permitan adoptar una conformación exclusiva; tienden a alternar entre formas distintas. Por lo común, cuando un polipéptido contiene entre 30 y 40 restos de aminoácidos aparecen fuerzas de cohesión internas que le capacitan para adquirir una forma predominante, aunque puede necesitar una estabilización adicional aportada por iones metálicos o enlaces de puentes disulfuro entre parejas del aminoácido cisteína.

En un entorno fijo, cualquier proteína constituida por cierto número mínimo de unidades de aminoácidos siempre se plegará del mismo modo. Ese entorno puede ser la solución salina diluida que corresponde a muchos de los líquidos biológicos o al medio que encierran las membranas lipídicas de las células; puede también incluir proteínas cercanas u otras partes de la misma larga cadena polipeptídica.

Una secuencia que se pliegue de manera espontánea adoptando una forma característica en un con-

RUSSELL F. DOOLITTLE y PEER BORK analizan las estructuras de las proteínas para desentrañar el curso seguido por la evolución. Doolittle, miembro de la Academia Americana de Ciencias, enseña biología en la Universidad de California en San Diego. Bork es profesor de la Universidad Humboldt de Berlín, tarea que comparte con la investigación en el centro Max Delbrück de Medicina Molecular de la capital alemana.



DOMINIO 2 DE CD2

junto definido de circunstancias recibe el nombre de dominio; con bastante frecuencia, y cierta impropiedad, se da también el mismo término a cualquier parte de una proteína cuya estructura difiera del resto. Algunas proteínas se integran en un solo dominio; muchas otras constan de dos o más; y las hay, por fin, constituidas por varios dominios, de formas parecidas o muy dispares entre sí.

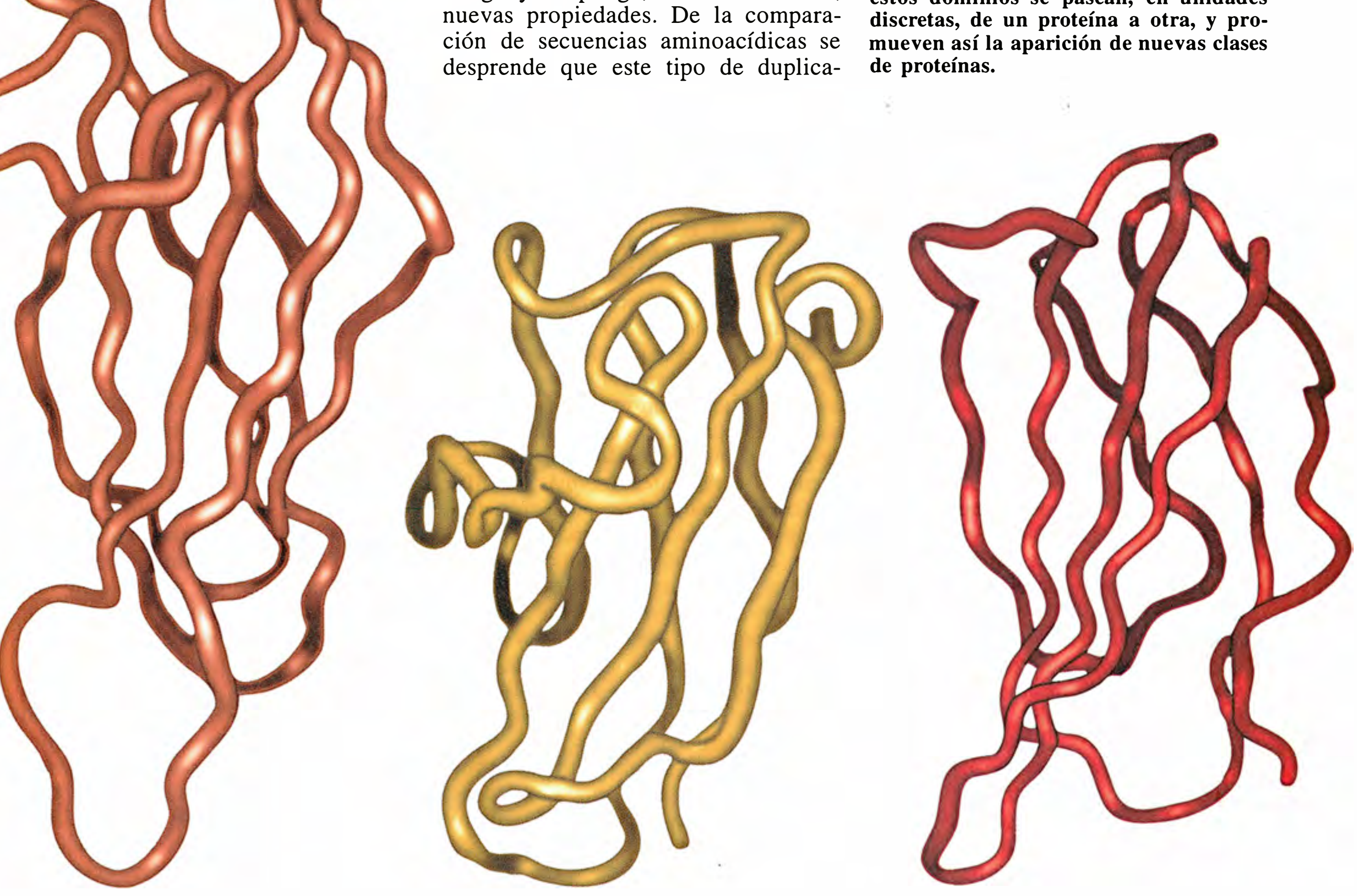
Para identificar un dominio, se determina la estructura de la proteína cristalizada mediante difracción de rayos X o a través de la resonancia magnética nuclear (RMN). Una vez identificada la secuencia aminoacídica, podemos encontrar otros dominios relacionados sin necesidad de recurrir a estudios estructurales: puede bastar la mera identificación de secuencias aminoacídicas semejantes a las de otras estructuras conocidas. Este atajo resulta muy útil, pues el número de secuencias conocidas es muy superior al de estructuras estudiadas por difracción de rayos X o por RMN. Sin disponer siquiera de determinaciones experimentales, se puede inferir la existencia de un dominio basándose en la secuencia. La consideración de las semejanzas de estructura y secuencia existentes entre proteínas ayuda a descifrar su evolución.

Hasta comienzos de los años setenta, las ideas dominantes sobre evolución de las proteínas se centraban en la "duplicación y modificación". Llegado el momento, el gen de una proteína se duplica por diversos procesos de recombinación, durante los cuales se intercambia información genética entre cadenas de ADN. A veces, la duplicación origina un segundo gen que puede entonces sufrir una modificación o mutación ulterior y, por ende, producir una proteína nueva con una función novedosa. En un proceso alternativo, el ADN duplicado puede ir en tándem, en cuyo caso la proteína original se alarga y despliega, en consecuencia, nuevas propiedades. De la comparación de secuencias aminoacídicas se desprende que este tipo de duplicación interna ha dado lugar al alargamiento de muchas proteínas, desde las breves ferredoxinas bacterianas (de 56 unidades aminoacídicas) hasta la extensa beta-galactosidasa bacteriana (con más de 1000.)

Hace unos veinte años salió a la luz un aspecto escondido de la evolución de las proteínas. Michael G. Rossmann, de la Universidad de Purdue, determinó la estructura tridimensional de la enzima lactato deshidrogenasa mediante difracción de rayos X. Advirtió que una parte de la molécula tenía rasgos muy parecidos a los que había visto en otras proteínas; en concreto, una parte de la enzima que se une a un cofactor se encontraba también reflejada en otras deshidrogenasas.

Pero esas semejanzas estructurales no se daban siempre en las mismas

1. MODULOS genéticamente móviles de las proteínas. La ilustración presenta dos tipos de estos bloques, que son secuencias lineales de aminoácidos que se pliegan para dar estructuras persistentes y reconocibles con propiedades bioquímicas características. Los dominios Fn3 y GHR son ejemplos de módulos de tipo III de fibronectina; los PapD y CD2, de inmunoglobulinas. En el curso de la evolución estos dominios se pasean, en unidades discretas, de un proteína a otra, y promueven así la aparición de nuevas clases de proteínas.



FIBRONECTINA

COLAGENO XII

10

PROTEINA MUSCULAR GIGANTE TITINA

n n 9

TIROSINA QUINASA DE RECEPTORES *EPH*

PROTEINA QUINASA SRC

TRIPLE HELICE DE COLAGENO — REGION TRANSMEMBRANA — SIN HOMOLOGIAS CONOCIDAS CON OTRAS PROTEINAS — BLOQUES REPETIDOS DE DOMINIOS n

Fn1 Fn2 Fn3 VWA TSPO Ig TIR-QUIN CRR S3 SH2

2. COMO PERLAS EN UN COLLAR, los dominios aparecen formando subunidades distintas de proteínas modulares. Algunas proteínas, como la fibronectina, el colágeno XII y la proteína muscular titina, contienen muchas repeticiones de unos pocos dominios.

partes relativas de las moléculas. Diríase que, en el curso de la evolución, la unidad se hubiera ido moviendo por el interior de la secuencia lineal de los aminoácidos, sin perder su función de enlace con un cofactor. Rossmann sugirió que las proteínas estaban construidas con módulos —nuestros dominios— que habrían aparecido en momentos precoces de la historia biológica y se habrían conjugado en diferentes combinaciones.

Se abría así una nueva posibilidad de evolución de las proteínas, que reforzaría notablemente lo conseguido por mera duplicación y modificación: la construcción de nuevas proteínas mediante la recombinación de otras multiplicaría ilimitadamente la diversidad proteica.

Rossmann acertó de pleno. Conocemos ya las secuencias aminoacídicas de muchas proteínas de gran tamaño; abundan entre éstas las estructuras repetitivas que cabría esperar de una ristra de módulos móviles. Fijémonos, por ejemplo, en la fibronectina, constituida por dos largas cadenas, cada una con más de 2000 aminoácidos. Una inspección somera reveló que las cadenas de esta proteína extracelular de gran tamaño están formadas por varias series de tres tipos diferentes de secuencias repetidas: Fn1, Fn2 y Fn3, con una longitud respectiva de 45, 60 y 100 aminoácidos. (Las repeticiones son "imperfectas", lo que significa que no todas la secuencias de un mismo tipo serán exactamente idénticas.) Es muy posible que cada tipo de unidades repetitivas se pliegue por su cuenta como un verdadero dominio, de suerte que la proteína vendría a ser algo así como un collar con tres tipos de perlas.

Para mayor sorpresa se encontraron después secuencias similares a las Fn1, Fn2 y Fn3 en proteínas animales muy diversas. Dígase lo propio de otros dominios ya identificados. El factor de crecimiento de la epidermis, constituido por un solo dominio (de 53 aminoácidos de longitud en su versión humana), tiene un plegamiento muy cerrado que se mantiene por tres puentes disulfuro. Se han identificado dominios de secuencias semejantes en más de 100 proteínas, donde están presentes desde una hasta una treintena de veces.

Se desconocen las funciones de muchas proteínas de éstas. Sí se sabe, de bastantes, que se unen a determinadas sustancias o son capaces de reconocerlas: una familia de lectinas que se acopla a diversos carbohidratos, el dominio inmunoglobulina, característico de los anticuerpos y otras moléculas del sistema inmunitario, que presenta una gran capacidad de enlace, o ciertos dominios convertidos en hitos de reconocimiento de acuerdo con los cuales una proteína queda identificada como perteneciente a un determinado tejido. Otros dominios parecen ser simples engarces o espaciadores, sencillas unidades de conexión. Por último, algunos podrían carecer por completo de función. De todo ello resulta manifiesto que muchos dominios pueden moverse, y de hecho se mueven, dentro de una proteína o saltar de una proteína a otra en el curso de la evolución. Mientras de esos movimientos no derive una alteración de la función, el coste evolutivo que importa mantener un dominio en un nuevo escenario resulta insignificante. Lo que viene a ser un corolario de la teoría neutralista de la evolución.

Cuando Rossmann sugirió que las unidades modulares podrían deambular por una misma proteína y entre distintas proteínas, nadie se preocupó por los mecanismos genéticos subyacentes a tales reorganizaciones. No tardaron, sin embargo, los biólogos moleculares en dar con una peculiaridad insospechada de los genes que parecía ofrecer una explicación. Como ya descubrieron en 1953 James Watson y Francis Crick, la información genética se inscribe en la doble hélice que forman las moléculas del ácido desoxirribonucleico (ADN). De igual modo que las proteínas son cadenas de aminoácidos, las moléculas de ADN son cadenas de nucleótidos. Las secuencias de bases de ADN se copian, o transcriben, como hebras complementarias

de ácido ribonucleico (ARN). En el interior de las células, los ribosomas se encargan de sintetizar proteínas a partir de las instrucciones del ARN: a cada codon, o secuencia de tres bases en el ARN, corresponde un aminoácido.

A mediados de los setenta se descubre que el ADN codificador de un polipéptido puede estar interrumpido por secuencias no codificadoras: agrupaciones de bases que no corresponden a la secuencia de ninguno de los aminoácidos presentes en el producto final que son las proteínas. Las secuencias no codificadoras se escinden y eliminan mediante un mecanismo de corte y empalme antes de que la hebra de ARN mensajero se traduzca en un polipéptido.

La observación de esos hiatos en los genes animó a Walter Gilbert, de la Universidad de Harvard, a sugerir que las secuencias no codificadoras, que denominó intrones (para significar secuencias de interrupción), facilitarían el intercambio de las partes codificadoras de los genes, que denominó exones (para significar secuencias de expresión). La idea era la siguiente: la distancia adicional entre los segmentos codificadores daría proporcionalmente mayores posibilidades de recombinación, que dependen de roturas aleatorias en el ADN. Se supuso que las semejanzas entre las secuencias de intrones originarían emparejamientos incorrectos y entrecruzamientos desiguales del ADN durante la recombinación, lo que facilitaría las reorganizaciones de los genes. Aunque en aquel momento no existía base alguna para afirmar que los intrones tuvieran secuencias semejantes, la investigación ulterior demostró que los intrones son una especie de abrigo de un número elevado de elementos genéticos móviles. La similaridad de secuencias en estos elementos móviles puede ser responsable de los fallos genéticos durante la meiosis, proceso de división celular que da origen al óvulo y al espermatozoide.

Hay muchos organismos que no pasan por la meiosis. ¿No habrán perdido una espléndida vía de conseguir nuevas proteínas? Los intrones que interrumpen la codificación de una proteína se encuentran sólo en el ADN de los eucariotas, organismos cuyas células poseen núcleo. Los genes de las proteínas bacterianas carecen de intrones: cada conjunto de tres bases de los nucleótidos corresponde a un aminoácido en la proteína. (Cierto es que se han descubierto en las bacterias algunos tipos de intrones, pocos, que no interrumpen las proteínas, pero ése es un tema que nos desvía de nuestro artículo.)

La ausencia de intrones en los genes de las proteínas bacterianas llevó a Ford Doolittle, de la Universidad de Dalhousie, y a James Darnell, de la Universidad de Rockefeller, a sugerir por separado que las bacterias podrían haber poseído intrones en el pasado y haberlos perdido. Presumiblemente, sus genomas se habrían ido refinando en el curso de la evolución hasta conseguir una replicación más eficiente. En resumen, los intrones habrían andado vagando desde la aparición de los seres vivos; han sido las secuencias codificadoras cortas las que se han generado distintamente.

La propuesta de Doolittle y Darnell condujo a un debate, todavía abierto, sobre si los intrones aparecieron o no en un momento "temprano" y si son fundamentales para el origen de todas las proteínas. Debemos a Thomas Cavalier-Smith, de la Universidad de la Columbia Británica, la hipótesis de la aparición tardía, de acuerdo con la cual los intrones serían fragmentos invasivos de ácidos nucleicos, elementos transponibles que se originaron en los organismos simbióticos; éstos acabaron convirtiéndose en mitocondrias y otros orgánulos de las células eucariotas. Donald Hickey, de la Universidad de Ottawa, y varios más, han desarrollado y ampliado esta opinión.

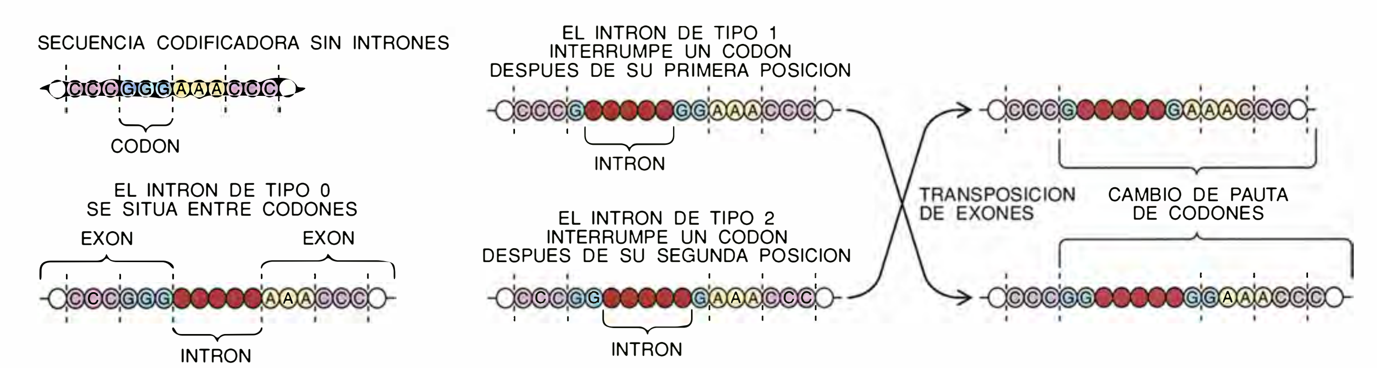
Los fragmentos de ADN codificadores de bloques de movilidad demostrada en el curso de la evolución de las proteínas se hallan con frecuencia, aunque no siempre, flanqueados por intrones. En otras palabras, las unidades estructurales de muchas proteínas están codificadas por exones. Esa observación contribuyó a la creencia bastante extendida según la cual, en el proceso evolutivo, todos los exones son móviles y corresponden a potenciales bloques modulares de las proteínas.

Nos parece una idea errónea, por dos motivos. El primero lo apuntó ya Lázló Patthy, del Instituto de Enzimología de Budapest; para éste, todos los exones entrarían en la baraja, aunque sólo una fracción de las unidades barajadas será genéticamente compatible; vale decir, muchos no podrán trasladarse a nuevas localizaciones sin perder su significado. Cuando un intrón se instala en una secuencia codificadora, ocupará una de las tres posiciones siguientes: entre dos codones (tipo 0), entre la

Tamaños de algunos dominios móviles

Los dominios móviles aparecidos en el curso de la evolución difieren entre sí por su talla. Algunos mantienen su morfología gracias, en parte, a los puentes disulfuro entre pares de restos del aminoácido cisteína. Otros dominios son estables sin esos puentes.

DOMINIOS QUE CONTIENEN PUENTES DISULFURO	NUMERO APROXIMADO DE UNIDADES AMINOACIDICAS	NUMERO DE CISTEINAS
Somatomedina B	40	8
C9 del complemento	40	6
EGF	45	6
Fn1	45	4
Fn2	60	4
"Apple" (Sushi) (βGP26)	61	4
Ovomucoide	68	6
VWF-C	72	8
Kringle	80	6
Kunitz	80	6
Nexo	~100	4
Receptor de células limpiadoras	110	6
Dominio emparentado con el fibrinógeno	250	4 o 6
SIN PUENTES DISULFURO		
Colágeno	18	
Rico en leucina	25	
"Gla"	35	
Enlazante de colágeno	50	
Parecido a la lectina	100	
Fn3	~100	
SH2	100	
SH3	100	



3. ESTRUCTURA INTERRUMPIDA de algunos genes codificadores de proteínas, divididos así en exones e intrones (secuencias que se expresan o secuencias intercaladas que no se expresan). Tripletes de bases en los exones se traducen en aminoácidos de las proteínas. Los intrones pueden interrumpir secuencias codificadoras en tres posiciones diferentes. Si los exones y los intrones se mueven al azar, las transposiciones entre diferentes tipos de intrones podrían dar lugar a mutaciones con cambio de pauta de lectura. Esa objeción debilita la idea de que todos los exones codifican módulos móviles.

primera y segunda posición de un codon (tipo 1), o entre la segunda y tercera posición (tipo 2). Si ese intrón y la segunda secuencia codificadora adyacente a él saltan a un nuevo lugar, el intrón debe adoptar el mismo tipo de posición; si no ocurre así, los codones que han saltado se traducirán incorrectamente y se producirá una secuencia aminoacídica sin sentido. Si los intrones se distribuyeran al azar cabría esperar que, después de ser barajados, sólo un tercio de las nuevas combinaciones de exones se encontrarían en fase. Curiosamente, una aplastante mayoría de los genes correspondientes a los módulos viajeros más frecuentes están flanqueados por intrones del tipo 1.

La otra razón fundamental por la que sólo algunos exones son móviles desde el punto de vista evolutivo se funda en que sólo los dominios verdaderos —aquellos que pueden plegarse entera e independientemente— podrán sobrevivir en el nuevo marco proteico. Las secuencias menores y menos autosuficientes serían incapaces de plegarse y perderían su identidad. Además, si una unidad emigrada aterrizase entre dos exones que no fuesen auténticos dominios, entonces el producto del gen que ha recibido la adición podría mostrarse incapaz de plegarse debidamente.

Estos dos factores, genético el uno y estructural el otro, contribuyen en buena medida a que los dominios móviles aparezcan con frecuencia en mutua compañía. No constituye ninguna rareza comprobar que las proteínas dotadas de un dominio móvil posean más; algunas, genuinos mosaicos, presentan hasta 5 módulos barajados y diferentes. Estos tipos de proteínas no se oponen, ni genética ni estructuralmente, al proceso del baraje.

Se ha afirmado que la observación según la cual muchos módulos están codificados por exones respalda la idea de que los organismos primitivos configuraron todas sus proteínas a partir de un depósito de componentes estructurales primitivos codificados en exones. Pero hay razones para oponerse a semejante interpretación. Basta un sencillo cálculo aritmético para demostrar que esos primitivos exones hipotéticos tendrían que haber sido demasiado pequeños para producir los componentes de las proteínas con capacidad de autoplegamiento. El tamaño medio de los exones conocidos en los genomas de vertebrados es, en la actualidad, de unas 135 bases de nucleótidos, lo que corresponde a un polipéptido de 45 aminoácidos. Una secuencia tan corta necesitaría una estabilización suplementaria para plegarse en una conformación persistente.

No se olvide que los defensores de la hipótesis del "intrón temprano" sostienen que con el transcurso del tiempo se produce una pérdida constante de intrones. Se han visto forzados a admitir esa conclusión ante la presencia esporádica de intrones en diversas especies. Este patrón inconstante podría ser el resultado de una ganancia o de una pérdida de intrones, aunque, si uno se aferra a la idea de que los intrones existieron desde el principio, la única explicación posible es la de su pérdida. De acuerdo con ello, los exones precoces habrían sido menores todavía, codificando polipéptidos de los que no cabe esperar razonablemente que puedan corresponder a dominios con capacidad de autoplegamiento.

Otro argumento en contra del carácter primitivo de las proteínas en mosaico tiene que ver con la distribución de dominios entre proteínas. La inmensa mayoría de los módulos móviles conocidos hasta la fecha se encuentran exclusivamente en proteínas animales. En este momento, no sabemos ni cuándo ni dónde surgieron. Quizás el rastro de su evolución haya quedado oscurecido en parte por amplios cambios de secuencia en dominios emparentados de plantas, hongos y protozoos. Según veremos más adelante, el hecho de que las estructuras tridimensionales sean más persistentes, en un sentido evolutivo, que las secuencias lineales podría ayudar a resolver este enigma.

Además de esas pruebas que rechazan que la mayoría de los exones sean móviles desde el punto de vista evolutivo, hemos de anotar que algunos dominios móviles tampoco son el producto de exones individuales. Cierto dominio de gran tamaño, descubierto en la molécula de fibrinógeno de los vertebrados, se compone de 250 aminoácidos. En algunas proteínas, el gen de ese dominio contiene intrones múltiples, pero ninguno de estos exones individuales se ha encontrado sin la compañía de los demás. Por lo que se ve, ninguno de los exones ha saltado por sí mismo fuera del dominio. Así pues, no basta la simple presencia de intrones en un gen para que los exones sean móviles. El hecho de que la inmensa mayoría de los exones identificados hasta la fecha no se haya encontrado en más de un escenario distinto constituye un argumento en contra de una movilidad simple e indiscriminada.

Existen otros ejemplos de unidades viajeras que contienen intrones dentro de sus secuencias de identificación. Uno de los primeros módulos viajeros en conocerse ha sido "kringle" (denominación que recibe por su parecido con una galleta danesa típica). Consta de unos 80 aminoácidos y 3 puentes disulfuro característicos. Recuerda bastante al dominio Fn2, del que difiere sólo por el número de restos aminoacídicos entre

sus cisteínas. En algunas de sus localizaciones, el gen de "kringle" tiene incrustado un intrón, pero hasta la fecha nadie ha encontrado la mitad de un "kringle" en ninguna proteína.

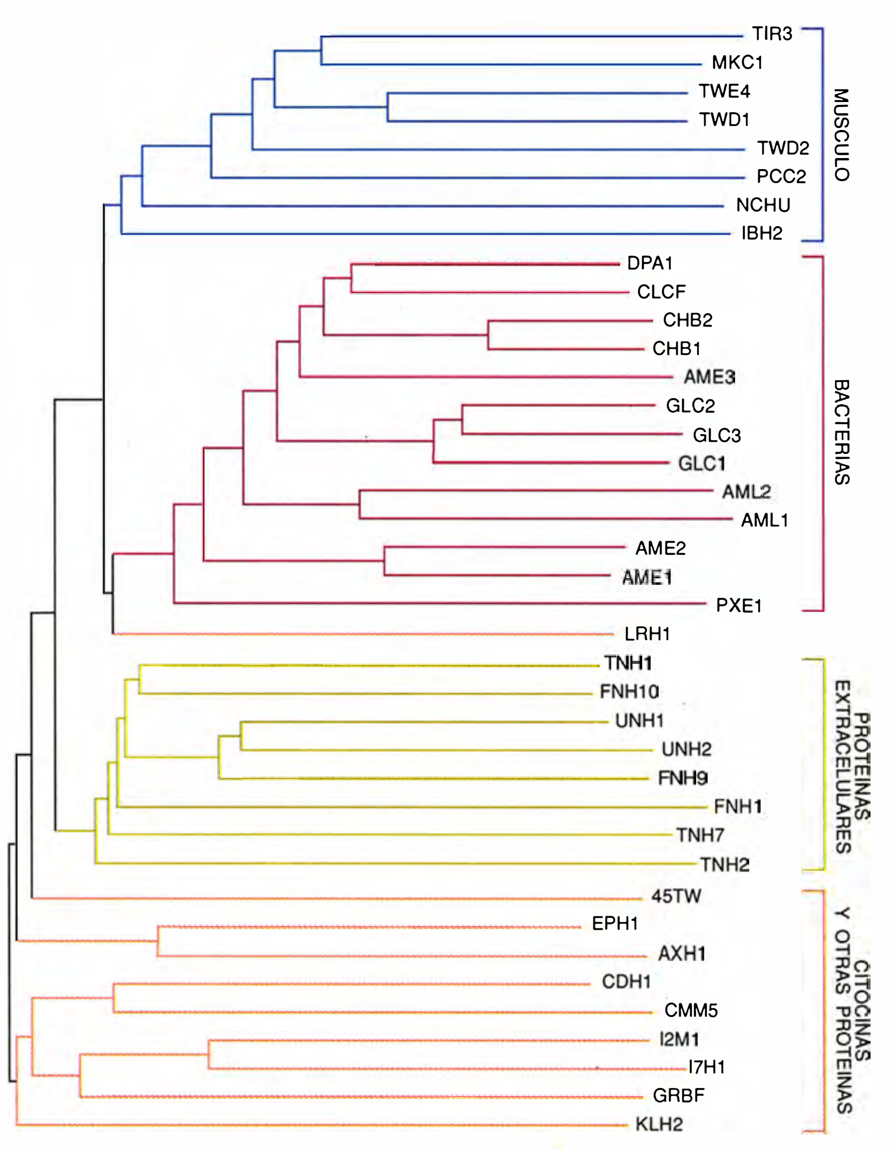
En favor de la teoría del "intrón tardío" abunda el hecho de que los intrones que interrumpen regiones de codificación son muchos más frecuentes en plantas y animales que entre los eucariotas primitivos en el momento de su diversificación. No se ha encontrado ningún intrón en eucariotas primitivos, como *Giardia lamblia*. Además, se han identificado proteínas modulares en vegetales sin que se hayan encontrado sus equivalentes en los animales. Y lo mismo sucede al revés. Por último, existen datos indirectos de que el ensamblaje modular de algunas proteínas bacterianas ha ocurrido en tiempos tan recientes que deben de haber surgido sin la ayuda de intrones. Todos estos datos sugieren que los intrones que interrumpen proteínas aparecieron después de la evolución de los eucariotas.

Vemos, pues, que la mayoría de los axones no codifican dominios, aunque lo hagan algunos; estos segundos se hallan a menudo genéticamente duplicados y participan en la baraja. No resulta fácil percibir la relación de causa a efecto en esos fenómenos. Quizá la evolución de estos intrones haya facilitado el baraje de los exones. Por otra parte, no es imposible que los intrones delimiten regiones codificadoras de dominios en razón de que esa localización ofrezca alguna ventaja para la propagación de los intrones.

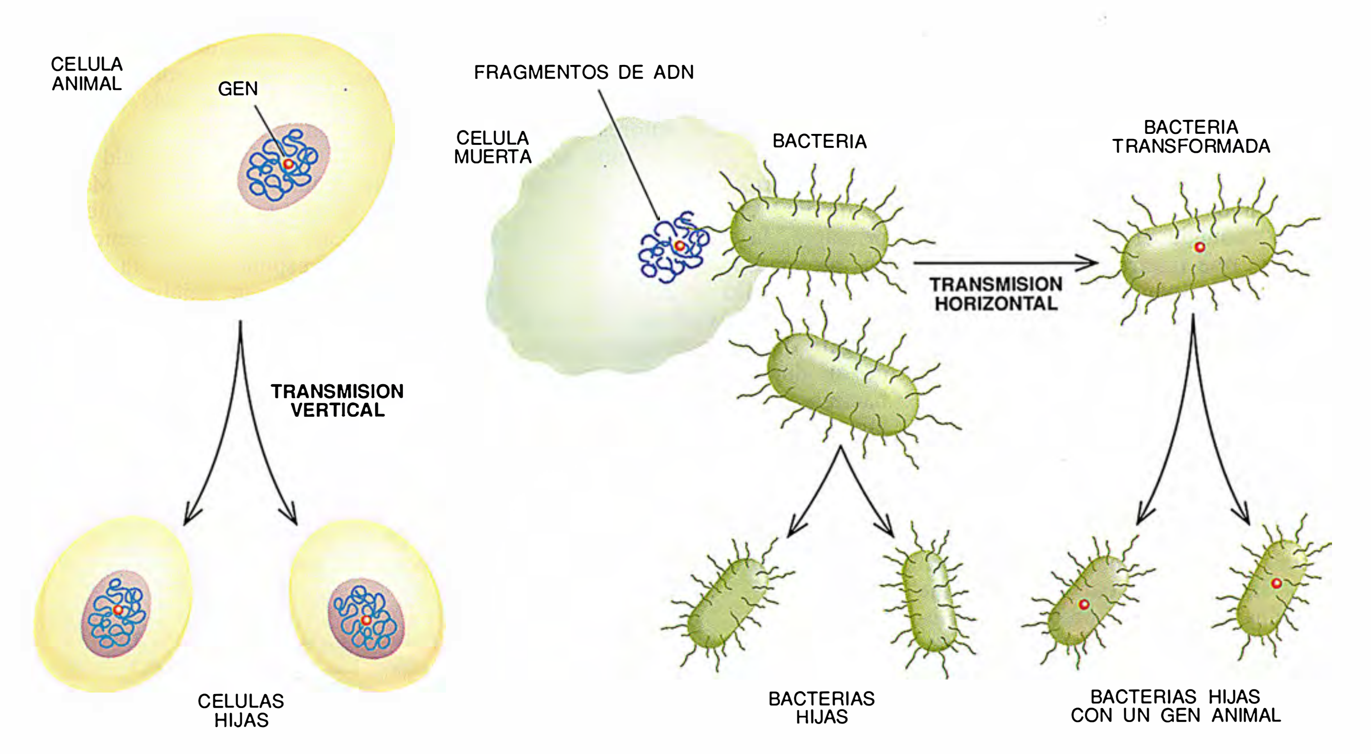
Si un intrón ha interrumpido una secuencia codificadora de un dominio, podría sobrevivir en esa situación (si es que no violó la regla de las fases apuntada anteriormente). Cesaría de difundirse, sin embargo, porque los exones unidos a él no podrían permanecer por sí solos y por tanto serían incapaces de moverse con independencia. A la inversa, si el intrón se sitúa entre regiones que codifican unidades de plegado independientes, podría saltar a otros lugares junto con los exones. Así pues, el proceso de baraje de exones podría ser sólo incidental para la supervivencia de los intrones.

Para ahondar en la evolución de los bloques móviles, atendamos a la estructura y dispersión de uno de ellos. Nuestro favorito es el Fn3, el dominio de tipo III de la fibronectina. Al igual que los "kringles", las unidades Fn3 suelen llevar incrustado un intrón, pero nunca se ha visto que éste tenga un número menor de los 90 o 100 aminoácidos que le corresponden. Los autores de este artículo hemos seguido por separado, durante varios años, el descubrimiento de Fn3 en diversas proteínas. Al principio, la secuencia aparecía sólo en proteínas animales, por lo que nos sorprendió en 1990 que un grupo de la Universidad japonesa de Niigata diera a conocer la existencia de un dominio Fn3 en una proteína bacteriana. Nuestro interés común se afianzó en una reunión celebrada en Italia en 1991, a raíz de la cual decidimos sumar esfuerzos para hacer un inventario global de la presencia del Fn3.

Con ese propósito hemos analizado una base de datos de secuencias de proteínas por varios medios, incluido un algoritmo de búsqueda de patrones diseñado por uno de nosotros (Bork) y Christian Grunwald en el Instituto Central de Biología Molecular en Berlín Oriental. Descubrimos más de 300 veces la presencia del motivo correspondiente a la secuencia del Fn3, lo que dejaba bien a las claras que se trataba de un auténtico dominio, si es que quedaba alguna duda. Esa presencia correspondía a 67 proteínas diferentes sin contar las mismas proteínas de especies distintas. Sesenta de ellas correspondían a animales y siete a bacterias. No se encontró ninguna de las secuencias identificadas en plantas, hongos o eucariotas unicelulares.



4. ARBOL FILOGENETICO DE LAS RELACIONES EVOLUTIVAS de 39 dominios Fn3 de diversa procedencia. Con la ayuda de un programa de ordenador, los autores han obtenido este árbol comparando las secuencias de dominios de animales y bacterias. Sorprende el estrecho parecido que los dominios bacterianos guardan con otros presentes en proteínas animales; de ahí podría inferirse que las bacterias han obtenido de los animales los genes de esos dominios.



5. TRANSMISION HORIZONTAL DE GENES, mecanismo que podría explicar la obtención, por las bacterias, de dominios procedentes de proteínas animales. Los genes pasan verticalmente entre generaciones de células. Las bacterias también pueden transformarse por la captación de ADN de su entorno. Si una bacteria capta el ADN de un dominio perteneciente a una célula muerta, podría transmitir ese gen a su descendencia.

¿Heredaron, de algún antepasado común, bacterias y animales este dominio? ¿Lo adquirió un grupo del otro? Si el dominio estuvo presente en el antepasado común de procariotas y eucariotas, ¿por qué no se encuentra ni en hongos ni en plantas? Con la ayuda de un ordenador alineamos todas las secuencias de Fn3 que pudimos encontrar y construimos un árbol filogenético provisional, basado en semejanzas. Dada la complejidad de abordarlo con las 300 secuencias, optamos por ceñirnos a grupos representativos de secuencias de todas las proteínas bacterianas y de sólo las más alejadas de las animales.

Había algo que no acababa de cuadrar. Las secuencias bacterianas se parecían demasiado a las secuencias animales para que hubieran descendido de un antepasado común de 2000 millones de años de antigüedad. Los datos (incluidos los árboles filogenéticos generados por ordenador) favorecían, por contra, la idea según la cual las bacterias habrían adquirido de fuente animal el dominio Fn3.

Varias razones avalaban la hipótesis. Veíase, en primer lugar, que con cierta frecuencia una enzima de una especie bacteriana portaba el dominio, pero no esa misma enzima en otra especie; eso indicaba que podía prescindirse, estructural y funcionalmente, del dominio. Por consiguiente, las bacterias específicas hubieron de haberlo adquirido más tarde. Añádase que las secuencias de Fn3 aparecían esporádicamente y en acúmulos, aunque siempre en un conjunto característico de enzimas extracelulares. Si las bacterias hubieran ido perdiendo copias de Fn3 con el paso del tiempo, lo lógico sería esperar la existencia de copias supervivientes en un conjunto más amplio de proteínas.

Por último, aunque las bacterias que tenían los dominios Fn3 pertenecían a tipos diversos, compartían ciertos rasgos. Todas eran bacterias del suelo, que obtenían su alimento de polímeros accesibles (celulosa y quitina), liberados durante procesos de descomposición. Se han examinado también muchas bacterias de otros tipos, pero ninguna aloja el dominio Fn3 en sus proteínas. Se conoce ya más de la mitad de la secuencia del genoma de la enterobacteria *Escherichia coli*; de momento no se ve ni rastro del dominio Fn3. Lo mismo puede decirse de un gran número de secuencias estudiadas pertenecientes a hongos y plantas. Si el dominio Fn3 lo hubiese portado algún antepasado común de procariotas y eucariotas, se reflejaría su existencia en las líneas principales de todos estos grupos.

La idea de que el gen correspondiente a un dominio emigre a organismos de remoto parentesco podría parecer, en principio, fuera de lugar. La observación diaria nos dice que los genes se transmiten verticalmente, de una generación de organismos a la siguiente. Pero cabe también la transmisión horizontal de ciertos genes, no sólo entre especies, sino también entre organismos de linajes muy alejados. Algunos virus captan genes pequeños de un huésped y los trasladan a otro; en casos poco frecuentes, el gen transportado puede quedar incorporado en el ADN del huésped destinatario. Las bacterias pueden transformarse al captar ADN de un entorno, incluido el de células animales en descomposición. Muchas bacterias portan también genes en pequeños anillos de ADN, o plásmidos, que intercambian con otras bacterias. En teoría, todos estos mecanismos representan oportunidades para la transmisión horizontal de genes.

Aceptemos que cierta bacteria recabó de una fuente animal el gen de un dominio Fn3, ¿cuándo aconteció eso? Todo lo que el árbol filogenético nos revela es que sucedió en el intervalo de los últimos 1000 millones de años, después de la separación de los animales de plantas y hongos. Para acotar la fecha, necesitamos saber el ritmo medio de cambio de secuencia, lo mismo en

bacterias que en líneas animales divergentes. Para las proteínas animales, podemos tener una idea de la tasa comparando secuencias de diversos organismos cuyos tiempos de divergencia conocemos gracias al registro fósil. Pero no disponemos de una información comparable sobre las secuencias bacterianas. (Aunque se han estudiado microfósiles bacterianos, no se dispone aún de una jerarquía evolutiva similar a la de los animales.) Podemos ver, sin embargo, tanto en proteínas animales como bacterianas, una tendencia a la duplicación en tándem de las secuencias Fn3; esto es, dentro de una proteína dotada de más de un dominio Fn3, las secuencias de estos dominios suelen ir adyacentes y de ordinario son muy semejantes. De acuerdo con esa observación, la duplicación del ADN codificador del dominio Fn3 hubo de producirse en fecha bastante reciente.

La determinación del momento de la transmisión horizontal y de las duplicaciones genéticas resulta decisiva para entender la propagación de estas unidades genéticas. Por lo que se conoce hasta la fecha, las bacterias contemporáneas carecen de intrones en sus secuencias de genes codificadores de proteínas. Si es que en alguna ocasión tuvieron intrones en sus secuencias de codificación, ¿cuánto hace que desaparecieron? A menos que haya sucedido en un momento más o menos cercano, los genes de Fn3 deben de haberse dispersado sin la ayuda de intrones.

Una posibilidad muy verosímil es que el dominio Fn3 se haya difundido entre bacterias del suelo a través de un bacteriófago (virus bacteriano) o plásmido. Confiamos en observar algún día el acto real de transmisión, si la suerte nos favorece y damos con un fago que porte un gen de un dominio Fn3. Se han encontrado ya algunas secuencias de Fn3 bacteriano; podría ahora lograrse la síntesis de marcadores cortos de ADN que se unan a las unidades genéticas de Fn3. Con el auxilio de la reacción de polimerización en cadena, esas marcas nos servirían para identificar los genes en el bacteriófago u otros vectores.

Continúa envuelto en el misterio el lugar en que haya podido originarse el dominio Fn3. ¿Brotó en los animales? ¿Somos, acaso, incapaces de identificar sus formas ancestrales mediante la comparación de secuencias? Las determinaciones tridimensionales muestran que la estructura del Fn3 es sospechosamente semejante a los dominios de las inmunoglubinas. El análisis tridimensional por cristalografía de rayos X y resonancia magnética nos ha posibilitado seguir la pista del dominio de inmunoglobulinas hasta las proteínas de procariotas, incluidas la PapD, una chaperona o acompañante que ayuda a otras proteínas a plegarse, y también hasta una enzima bacteriana que digiere celulosa. Reviste particular interés saber que el dominio inmunoglobulina (así se le llamó en un principio) contiene un puente disulfuro que deja pinzados ambos lados de su estructura, aunque las formas más primitivas, algunas de las cuales subsisten en ciertos vertebrados actuales, carecen de ese enlace. Son estas formas primitivas las que más se asemejan al dominio Fn3.

Podemos pronosticar el descubrimiento de otros módulos pirateados. Según nuestro censo, el dominio Fn3 está presente en una de cada cincuenta proteínas animales (50 entre 2500 secuencias de proteínas animales conocidas, sin tener en cuenta redundancias en otras especies). De acuerdo con nuestros cálculos, hay unos 25 módulos entretejidos en las proteínas animales, a la manera de lo descrito en Fn3. Un centenar largo se repiten en más de un lugar, aunque con una frecuencia menor que los del primer grupo. El trazado del árbol genealógico y el seguimiento de la diáspora de estas unidades modulares representan grandes retos para los biólogos moleculares que bracean por sacar a la luz aspectos de la evolución, sumidos aún en penumbras.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE GENEALOGY OF SOME RECENTLY EVOLVED VERTEBRATE PROTEINS. Russell F. Doolittle en *Trends in Biochemical Sciences*, vol. 10, n.º 6, págs. 233-237; junio de 1985.

PROTEIN MODULES. Martin Baron, David G. Norman y Iain D. Campbell en *Trends in Biochemical Sciences*, vol. 16, n.º 1, páginas 13-17; enero de 1991.

MODULAR EXCHANGE PRINCIPLE IN PROTEINS. Lázló Patthy en *Current Opinion in Structural Biology*, vol. 1, n.º 3, páginas 351-361; junio de 1991.

MOBILE MODULES AND MOTIFS. Peer Bork en *Current Opinion in Structural Biology*, volumen 2, n.º 3, páginas 413-421; junio de 1992.

PROPOSED ACQUISITION OF AN ANIMAL PROTEIN DOMAIN BY BACTERIA. Peer Bork y Russell F. Doolittle en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, volumen 89, n.º 19, págs. 8990-8994; 1 de octubre de 1992.

Ciencia y sociedad

Paleontología

Dryopithecus y el origen de los grandes monos actuales

En el verano de 1991, un equipo del Instituto de Paleontología Miquel Crusafont de Sabadell (Barcelona) descubrió en el yacimiento de Can Llobateres (Sabadell) los primeros restos craneales de un gran mono fósil encontrados en España. Este yacimiento, situado en el extremo nororiental de la península Ibérica, está datado en 9,5 millones de años en sus niveles inferiores y cerca de 9 en los superiores, donde se localizaron los restos de *Dryopithecus*.

El género *Dryopithecus*, descrito por Edouard Lartet en 1856, ha desempeñado un papel destacado en la historia del conocimiento de los Hominoidea fósiles y actuales. En la década de los sesenta agrupaba aún todos los géneros de grandes monos miocénicos, y se le consideraba una forma primitiva sin especial vinculación de parentesco con las formas actuales.

Opinión que ha cambiado en los últimos años. Ahora, la mayoría de los especialistas admite que *Dryopithecus* es un género que vivió en Europa desde el Mioceno medio hasta el Mioceno superior (14 a 8 millones de años antes de la actualidad) y que difiere de formas tales como *Proconsul* o *Kenyapithecus*. Pero aquí acaban los puntos de acuerdo. Se debate qué posición ocupa en el árbol filogenético de los Hominoidea, y son objeto de discusión sus relaciones con el grupo de los grandes monos vivientes. Ante ese cuadro, nuestro hallazgo proporciona nueva información que nos ha obligado a volver a examinar la evolución temprana de los implicados.

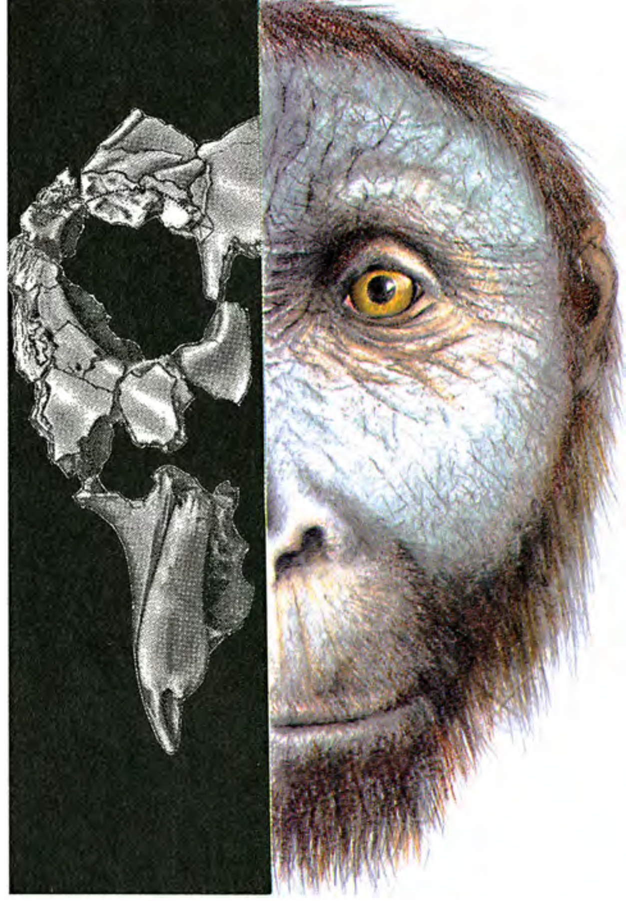
El grupo de los Hominoidea ofrece cinco representantes vivos, divididos en dos subgrupos: uno más primitivo, que abarca sólo el gibón, y el segundo, que comprende los grandes monos vivientes (chimpancé, gorila, orangután y hombre). ¿Junto a cuál hay que situar a *Dryopithecus*?

Entre los fragmentos craneales de Can Llobateres, una parte del hueso temporal con la petrosa (hueso del oído) se conserva en muy buen estado. Acontece que los caracteres morfológicos obtenidos a partir de estructuras de la complejidad del oído, y carentes de un manifiesto componente adaptativo inmediato, suelen ser útiles para resolver problemas filogenéticos. Por consiguiente, analizamos a fondo la petrosa del ejemplar CLL-18000, en sí misma y en comparación con todas las disponibles, fósiles (sólo se conoce la de *Proconsul*) y actuales.

En los restos de Can Llobateres falta por completo la fossa subarcuata, profunda depresión en la cara endocraneal de la petrosa donde se aloja una prolongación del cerebelo denominada paraflocculus. Esta fosa, que aparece en todos los primates y en los hominoideos primitivos (por ejemplo, el actual *Hylobates* o el fó-



Ejemplar craneal de Dryopithecus laietanus *(CLL-18000) de Can Llobateres (Sabadell, España)*



Ensayo de reconstrucción de Dryopithecus laietanus *de Can Llobateres, a partir del ejemplar CLL-18000*

sil *Proconsul),* se halla ausente en los componentes vivos de los Hominidae (*Pan*, *Gorilla*, *Pongo* y *Homo*); dicha ausencia va ligada a la reducción del paraflocculus. El hecho de que *Dryopithecus* comparta este carácter con los Hominidae constituye una prueba de que puede pertenecer al mismo clado.

Si aceptamos esta hipótesis de partida, es decir, que *Dryopithecus* se inscribe entre los grandes monos, tres son sus alternativas filogenéticas*:* es miembro del clado de los grandes monos africanos, pertenece al mismo clado que *Pongo* o es un grupo hermano de ambos.

Dryopithecus presenta una morfología facial con una combinación de caracteres particular. Vemos, así, que exhibe un importante conjunto de caracteres primitivos: ausencia de prognatismo, segundo incisivo superior no muy reducido, amplia distancia interorbital, proporciones de las órbitas y morfología de la zona supraorbital. Tomados en su conjunto, esos rasgos nos indican que *Dryopithecus* no debió diferir mucho de lo que fuera el ancestro común de la familia Hominidae.

Sí es, por contra, muy peculiar la morfología de la parte facial del hueso zigomático, que externamente se corresponde con el área de las mejillas. De notable robustez, el zigomático descubierto es acentuadamente plano y orientado hacia adelante y, lo que resulta más llamativo, posee tres forámenes zigomáticos (por donde pasan numerosos vasos sanguíneos que riegan la zona de las mejillas), situados por encima del borde orbital inferior. Otros dos zigomáticos de *Dryopithecus* del yacimiento húngaro de Rudabanya, aunque menos completos que los de Can Llobateres, presentan las mismas características.

Se trata de una morfología muy poco frecuente en el grupo de los primates. Formas fósiles como *Proconsul* o actuales como *Hylobates, Pan* o *Gorilla* poseen un zigomático que difiere del que caracteriza a la forma fósil europea; aquél es menos robusto, más curvado, sin tanta orientación anterior y dotado de sólo 1 o 2 forámenes zigomáticos situados por debajo del reborde orbital. Esta es, por otro lado, la morfología más extendida entre los primates y puede considerarse primitiva.

Unicamente dos formas, una fósil y otra actual, poseen características similares en el área del zigomático: *Sivapithecus*, del Mioceno de Pakistán, y el actual orangután de Sumatra y Borneo. A lo largo de los últimos diez años, se han debatido con especial viveza las posibles relaciones de parentesco de *Sivapithecus*; aunque no hay un acuerdo general, se la considera forma hermana del orangután.

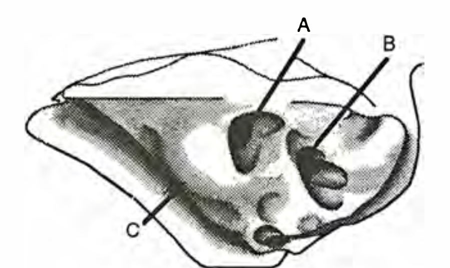
Relaciones de parentesco entre los hominoideos actuales y posición filogenética de Dryopithecus. *La sistemática de los seres vivos se fundamenta en las relaciones de parentesco entre ellos, refleja así la filogenia y permite, pues, considerar grupos naturales las diferentes categorías taxonómicas. La cladística es un método de inferencia filogenética: a partir de una serie de postulados intenta reconstruir las relaciones de parentesco entre los integrantes de un grupo. Las hipótesis de relaciones filogéneticas se expresan en cladogramas. Se usa el término clado para definir una rama (o agrupación) del árbol*

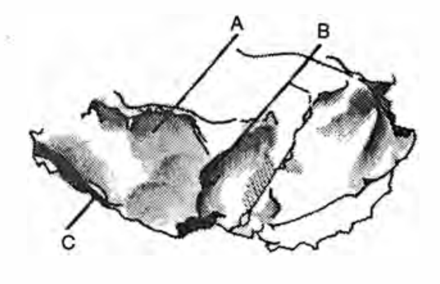
Mirado bajo esta óptica, resulta fácil suponer que *Dryopithecus* no es más que un representante primitivo (plesiomórfico) del clado de *Pongo*, que ha mantenido una morfología facial primitiva excepto en el área zigomática, donde muestra los caracteres evolutivos derivados del orangután.

¿Por qué el zigomático? ¿Qué sentido tiene modificar este hueso en la dirección antes mencionada? La respuesta nos la ofrece el orangután: tal estructura ósea tiene por misión dar soporte físico a las enormes mejillas de grasa y tejido conjuntivo presentes en *Pongo*, lo que explica la robustez y rugosidad del zigomático, y el elevado número de forámenes va ligado a la necesidad de una mayor irrigación sanguínea e inervación de dichas mejillas. De éstas se valen los orangutanes machos para mostrar el rango que ocupan. La presencia en *Dryopithecus* de una morfología similar nos lleva a pensar que los machos estarían provistos de unas estructuras parecidas, con funciones muy afines seguramente.

No se nos escapa cuán arriesgado puede parecer fundar la pertenencia de *Dryopithecus* al clado del orangután sobre la morfología de un hueso de la cara. Pero no debemos olvidar que los "eslabones perdidos" son, quizá, más fáciles de encontrar que de reconocer. La controversia suele rodear las interpretaciones que se ofrecen sobre los fósiles que se hallan en nudos evolutivos parecidos.

Sea cual sea la solución correcta que se dé al enigma de *Dryopithecus,* una cosa está clara: vivió en el lugar y el tiempo adecuados para estar vinculado al clado de *Pongo.* Hace probablemente unos 14 millones de años, una forma africana que no conocemos, o no hemos podido identificar y que tal vez no diste mucho de *Kenyapithecus*, colonizó Eurasia. La posterior evolución de las diferentes poblaciones condujo a la aparición de formas diversas, entre las que *Dryopithecus* se mantuvo primitivo, y otras, *Sivapithecus* por ejemplo, se acercaron, en su evolución, hacia el orangután actual. Las poblaciones que quedaron en Africa son las que, probablemente, originaron la otra línea, la que conduce al chimpancé, gorila y, a través de *Australopithecus*, hasta el hombre, y de la cual no sabemos nada. Los previsibles futuros hallazgos habrán de confirmar estas hipótesis o plantear otras. (*Salvador Moyà y Meike Köhler, del Instituto de Paleontología Miquel Crusafont, de Sabadell.*)





Petrosa de Dryopithecus, *a la derecha, y su comparación con la del hominoideo primitivo* Hylobates, *a la izquierda. La petrosa es un hueso del oído. La letra A designa la fossa subarcuata, que falta en* Dryopithecus*; con la B se indica el meatus auditivo interno y con la letra C, la foseta ungular*

Cosmología

La masa de los neutrinos solares

Para ser una partícula subatómica tan pequeña y carecer de carga y (quizá) de masa, el peso científico del neutrino es muy grande. Las reacciones de fusión gracias a las cuales el Sol brilla generan neutrinos, pero en un número que viene a ser sólo unas dos terceras partes del que la teoría predice. Alguien, pues, anda equivocado: el astrónomo, que explica la estructura interna del Sol, o el físico, que describe la naturaleza de las partículas elementales. Dos ingeniosos experimentos refuerzan la idea de que es la física la que necesita enmienda.

Se descubrió el déficit alrededor de 1970, poco después de que Raymond Davis, Jr. instalase un detector subterráneo —un gigantesco tanque de percloroetileno— en la mina de oro Homestake, en Dakota del Sur. Las posteriores observaciones del Kamiokande, detector de neutrinos radicado en el Japón, confirmaban, parecía, el resultado.

Hace tres años, otro detector, de un tipo diferente, el Experimento Soviético-Americano del Galio (SAGE), empezó a funcionar bajo el monte Andyrchi, en el Cáucaso. Contiene un depósito de 60 toneladas de galio líquido. En raras ocasiones, un neutrino choca con un átomo de galio 71 y lo transforma en germanio 71. El número de átomos de éste que se registran en el tanque indica la magnitud del flujo de neutrinos solares que atraviesa el dispositivo. En 1991, un experimento similar, el GALLEX —de "Experimento del Galio"— comenzó en el laboratorio del Gran Sasso, enterrado en la ladera de este pico de los Apeninos.

SAGE y GALLEX ofrecen una profunda visión de la física solar gracias a su sensibilidad a los neutrinos que se producen en las colisiones de dos protones, que, en el Sol, son la reacciones generadoras de energía fundamentales. Los cálculos teóricos de John N. Bahcall señalan que los detectores de galio deberían captar un flujo de unas 130 unidades de neutrinos solares. En septiembre, un grupo de investigadores del SAGE informaron que habían detectado unas 70 unidades. El grupo de 56 personas que participa en el GALLEX ha publicado hace poco en *Physics Letters B* que este instrumento recibe unas 87 unidades de flujo de neutrinos.

Estas cifras presentan grandes márgenes de error; deben, pues, ser tenidas por compatibles según opina Michael L. Cherry. A los modelos solares les quedan también muchos cabos por atar. Pero, ¿son los errores tan grandes que puedan explicar el problema de los neutrinos solares? Douglas R. O. Morrison piensa que sí. Otra es la opinión de Bahcall y Cherry: que sean cuatro los detectores que arrojan un número de neutrinos solares menor que el esperado prueba que el problema es real. Bahcall y Hans A. Bethe han ejecutado mil simulaciones por ordenador de los procesos físicos del interior del Sol. En ninguna obtuvieron un flujo parecido a los observados. Aun cuando los recuentos de neutrinos tuviesen errores sistemáticos, añade Bahcall, los números relativos detectados a varias energías contradirían las previsiones teóricas. Richard L. Hahn coincide en que "cuesta mucho casar el modelo solar normal con los datos de los experimentos de neutrinos".



El laboratorio del Gran Sasso alberga el GALLEX y otros experimentos en marcha sobre neutrinos. La instalación subterránea reduce las señales espurias debidas a radiaciones no deseadas

¿A dónde han ido a parar los neutrinos solares? Según una teoría cuyos cimientos puso Lincoln Wolfenstein y desarrollaron Stanislaw P. Mikheyev y Aleksei Y. Smirnov, los neutrinos "oscilan" entre tipos distintos. Por este efecto MSW, el neutrino electrónico, el que se manifiesta en los actuales detectores, se transformaría en otras formas de neutrinos, a las que esos aparatos son ciegos.

Si fuese así, el neutrino habría de tener una masa minúscula pero no, en contra de lo que se suponía, nula. Hace ya mucho que los cosmólogos se preguntan si la "materia oscura", ese componente invisible del universo que tanto afectaría a la evolución y dinámica de las galaxias, no estará constituida en su integridad o en parte por neutrinos dotados de masa. Si los resultados sobre los neutrinos solares se mantienen en pie, se ganará además un premio extra: el respaldo a la teoría de gran unificación —cuyo objeto es la unificación de todas las fuerzas naturales excepción hecha de la gravedad—, ya que en ella se basa la conjetura MSW. (*Corey S. Powell.*)

Movilidad génica

Mariner*, ¿de simple transposón a vector general de integración?*

A principios de los años cincuenta, Barbara McClintock, investigando la genética del maíz, describió unos elementos genéticos nuevos, de comportamiento extraño, a los que llamó "elementos controladores". Inhibían la expresión de algunos genes del maíz con los que estaban en estrecho contacto; además, en vez de presentar una localización cromosómica precisa, parecían poder moverse por el genoma del maíz. Tales elementos controladores podían insertarse en una posición para después ser separados, produciendo, en consecuencia, la pérdida y recuperación de la actividad de un determinado gen. Los resultados de McClintock no fueron apreciados en su época, por la razón principal de que entraban en conflicto con la idea dominante según la cual los genes tenían una situación precisa, estable y definida en los cromosomas.

Hacia finales de los sesenta se comprobó que ciertas mutaciones en *Escherichia coli* se debían a inserciones de determinadas secuencias; a partir de entonces empezó a vislumbrase la posibilidad real de que hubiera elementos móviles en los genomas de los organismos.

Se han acuñado diversos nombres para designarlos: elementos controladores, genes saltarines, secuencias de inserción y transposones. Esta última denominación, junto con la de elemento genético transponible (TGE,

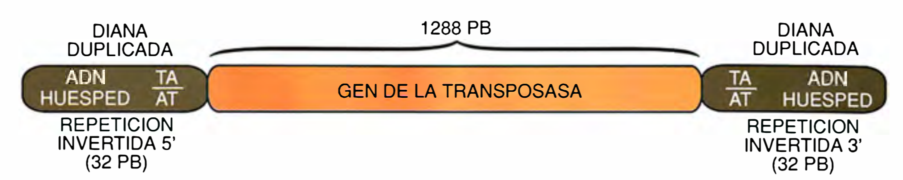
acrónimo de su equivalente inglés), son los que gozan de mayor aceptación. Pero bajo ese apelativo se agrupan elementos de muy diverso origen. Actualmente se les divide, en razón de su estructura y mecanismo de transposición, en dos grandes particiones: la clase I contiene los elementos móviles que "se transponen" mediante transcripción inversa de un ARN intermediario, en tanto que la clase II alberga los que se transponen directamente de ADN a ADN.

Los transposones han sido objeto de numerosos estudios, no sólo *per se* sino también por el papel que pudieran representar en la evolución del genoma, al que conferirían una flexibilidad y capacidad de mutación y adaptación mucho más elevadas de lo que se venía suponiendo. A pequeña escala, los genes en los que se insertaban podían ser interrumpidos o activados, o incluso podían variar la regulación de su expresión. A mayor escala, y debido a su ubicuidad y a la recombinación entre elementos, podían estar implicados en reorganizaciones cromosómicas (inversiones, duplicaciones, deleciones y translocaciones). A escala poblacional, podían interponer barreras genéticas que favorecerían la especiación al impedir el cruzamiento entre poblaciones hermanas.

Pero, además, los elementos transponibles parecen ser el resorte de una mayor variabilidad genética.

La transmisión vertical (es decir, la que procede de padres a hijos) de secuencias de ADN o ARN constituye la base indiscutible del componente genético de la evolución y el mantenimiento de la vida. Ahora bien, en biología, nada es inmutable o definitivo; siempre existen excepciones. Cada dían aparecen nuevos datos de transmisión horizontal (es decir, la que se da de un organismo a otro ya formado a través de un vector); por tanto, cierta información genética portada por los organismos puede no proceder de los progenitores, sino que proviene de otros organismos co-generacionales. Más aún, esta información puede transmitirse no sólo a organismos similares, sino traspasar barreras taxonómicas que se dirían inviolables.

En el centro de dicha transmisión se encontrarían principalmente elementos transponibles. Durante el proceso otros genes podrían saltar la barrera, incorporándose en el acervo génico del sujeto receptor. La transmisión horizontal abre, pues, una nueva posibilidad de flexibilización y evolución del genoma, mediante la adquisición de nueva información genética.



Estructura del transposón planaria mariner-*1. Entre las repeticiones invertidas terminales se halla el gen que produce la proteína transposasa, responsable de la movilización (escisión e integración) del elemento*

En 1986, un grupo de investigadores, dirigido por D. L. Hartl, de la Universidad Washington de Missouri, descubrieron un nuevo transposón en una cepa de la mosca de la fruta *Drosophila mauritiana*. El transposón *mariner*, así le llamaron, se encontraba integrado en el gen que controla el color de los ojos del insecto (el gen *white*). La integración del elemento provocaba la inactivación parcial del gen, produciendo moscas *white peach* (ojos color melocotón). Sin embargo, en la mayoría de casos, los ojos no presentaban un color uniforme, sino que dibujaban un mosaico: sobre un fondo de color melocotón, algunos grupos de células producían el pigmento normal, de color rojo.

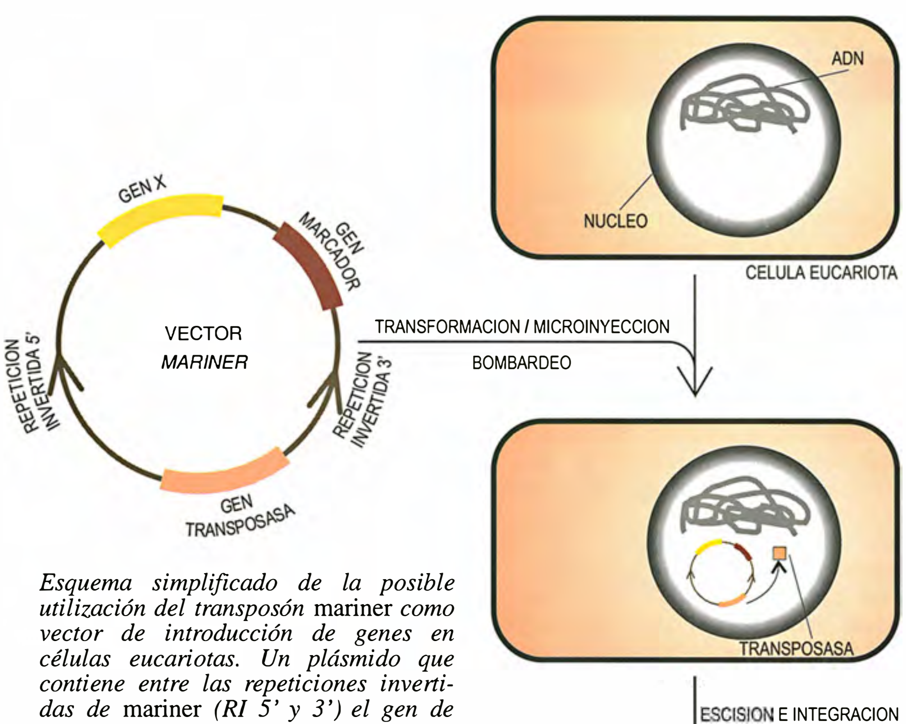
El comportamiento inestable de esta mutación recuerda los experimentos de McClintock con el maíz. Efectivamente, la inserción de *mariner* en el gen *white* lo inactiva; pero, durante el desarrollo embrionario, el transposón salta a menudo de su posición, restaurándose la función del gen en la célula en la que se ha producido el salto y en sus descendientes. Así, el ojo de la mosca adulta constará de dos tipos de células: aquellas (la mayoría) en que el transposón no se ha movido de su sitio, y serán de color melocotón, y aquellas que procedan de alguna célula en la que, en un momento del desarrollo, el transposón haya saltado, que serán de color rojo.

El transposón *mariner*, que sigue la vía del ADN, pertenece a la clase II. Se trata de uno de los transposones eucariotas más pequeños y de estructura más sencilla. Tiene una longitud de poco menos de 1300 pares de bases (pb), y se compone de dos repeticiones invertidas de 28-38 pb que delimitan un único gen, codificante de la transposasa, enzima a la que se supone responsable, por sí sola, de movilizar (escindir e integrar) el transposón. Por lo que sabemos, *mariner* se integra siempre en el dinucleótido timidina-adenina (TA), duplicando esta diana a ambos lados del transposón. Al escindirse, deja el "recuerdo" (de hecho una mutación) de la duplicación de la diana (TATA).

Una vez aislado el primer transposón *mariner*, el mismo grupo estudió la presencia de elementos *mariner* en otras especies del género *Drosophila*, descubriendo que tiene una distribución irregular: se encuentra sólo en algunas especies del género y en un número limitado de copias (de 1 a 30 por genoma). La presencia o ausencia del transposón no podía ser explicada por mecanismos normales de transmisión vertical, es decir, de padres a hijos, ni por la historia evolutiva de las especies. Se propuso entonces que la presencia del transposón obedecía a la combinación de dos procesos: pérdida en algunas especies e incorporación en otras por transmisión horizontal. La última hipótesis se ha visto reforzada por el aislamiento de elementos *mariner* en otras especies de insectos, sólo ligeramente emparentadas con *Drosophila*. El más claro ejemplo fue el hallazgo casual, en 1991, de elementos *mariner* en una polilla, realizado por D. A. Lidholm y colaboradores, de la Universidad de Estocolmo.

Muy recientemente, H. M. Robertson, de la Universidad de Illinois, utilizando la técnica de reacción de polimerización en cadena (RPC), analizó 404 especies de artrópodos, mayoritariamente insectos, detectando y aislando parcialmente *mariner* en 63 especies. La presencia, ausencia y distribución de las diferentes familias de *mariner* en las especies analizadas difícilmente pueden ser explicadas sin apelar a la transmisión horizontal. Su trabajo, publicado el pasado mes de marzo en *Nature*, implicaba casi sin duda que *mariner* había "saltado" entre especies de artrópodos alejadas en la taxonomía, sugiriéndose, además, que este transposón podía funcionar correctamente en especies muy distintas, al contrario de otros elementos transponibles, que tienen un rango de huéspedes limitado.

Los trabajos comentados han ganado en expansión con el reciente hallazgo por parte de nuestro grupo, del departamento de genética de la Universidad de Barcelona, de elementos *mariner* en la planaria *Dugesia tigrina*. Las planarias, o gusanos planos, pertenecen al *phylum* Platel-



Esquema simplificado de la posible utilización del transposón mariner *como vector de introducción de genes en células eucariotas. Un plásmido que contiene entre las repeticiones invertidas de* mariner *(RI 5' y 3') el gen de interés (X) y un gen marcador (por ejemplo, de resistencia a un antibiótico), junto al gen codificante para la proteína transposasa, se introduce en una célula. La transposasa produce la escisión e integración estable en el genoma del ADN flanqueado por las repeticiones de* mariner

mintos, organismos filogenéticamente muy antiguos, cuya rama evolutiva se separó muy pronto del resto de los metazoos, mucho antes de que se originaran los artrópodos y el resto de animales superiores. Al analizar el gen de un factor de transcripción de esta planaria, detectamos la inserción en su proximidad de un elemento *mariner* similar al de los insectos. El trabajo ulterior nos evidenció que el genoma de esta especie de planaria contiene unas 8000 copias muy similares del transposón. Logramos, por fin, aislar y secuenciar un elemento *mariner* completo; le impusimos el nombre de *planaria mariner*-1.

Si atendemos a su estructura, *planaria mariner*-1 es muy similar a los elementos aislados en insectos. Tiene una longitud de 1288 pares de bases, está delimitado por dos repeticiones invertidas de 32 pb e incluye el presumible gen de la transposasa, que estaría compuesto por 339 aminoácidos. Al igual que el resto de *mariner* de los que se dispone de información, también en este caso parece haberse producido la duplicación del dinucleótido TA en el lugar de inserción.

La presencia de *mariner* en planarias reviste obvio interés en el campo de la transmisión horizontal. Aunque no pueda excluirse la posibilidad de un origen antiquísimo del elemento, anterior a la separación de los linajes que originaron Platelmintos y Artrópodos, la estrecha similitud entre *planaria mariner*-1 y ciertos elementos de insectos, así como la ausencia del transposón en *Dugesia mediterranea* (otra planaria), indican que se ha podido dar un proceso de transmisión horizontal entre planarias y artrópodos, es decir, entre diferentes *phyla* animales.

Si entre organismos estrechamente emparentados los mecanismos de transmisión horizontal andan lejos de estar claros (se han propuesto, como posibles vectores, virus y parásitos de amplio espectro de huésped), mucho más obscuros están en el caso de planaria. Nuestro trabajo sugiere que este transposón, uno de los más sencillos y pequeños, ha "saltado" grandes distancias (inter-*phyla*), y puede intervenir en organismos muy diversos.

La presencia de *mariner* en planarias puede tener notables consecuencias prácticas. Importa, en ingeniería genética, encontrar un vector de transformación lo más universal posible, un sistema que permita la integración de genes o fragmentos de ADN en diversos genomas (de ratón, mosca o planaria). La mayoría de los vectores de integración utilizados hasta la fecha (retrovirus en vertebrados, transposones en *Drosophila*) presentan el inconveniente de su alta especificidad de huésped, y no sirven de sistemas generales. Ya cuando se aisló en insectos distantes, taxonómicamente hablando, de *Drosophila*, se propuso que *mariner* podría utilizarse como vector general de integración en insectos de interés agrícola. El hallazgo en planarias amplía el espectro: podría ser que un vector derivado de *mariner* constituya un sistema universal de integración. La transformación no sólo implica la introducción de genes en organismos en los que actualmente no es posible, sino que sirve también para inactivar (mutar) genes, lo que abre la puerta para realizar estudios de biología del desarrollo y otros de pareja índole genética en animales que hasta ahora nos estaban vedados; de momento, existen técnicas de transformación estable en *Drosophila* y ratón.

En teoría, el esquema es sencillo. Si una célula o una parte de un organismo se transforma, inyecta o bombardea con un elemento *mariner* inactivo, al que se la ha introducido el gen de interés, juntamente con un gen capaz de producir transposasa, se consigue que el transposón inactivo (que contiene el gen en cuestión) se integre en el genoma de la célula huésped. Al ser el transposón inactivo, la integración será estable, no podrá movilizarse de nuevo, y si la célula transformada, o alguna de sus descendientes, pasa a la línea germinal, se obtiene un organismo transgénico.

Aunque queda mucho por investigar sobre el funcionamiento y requerimientos de este vector general, se acaban de publicar unos primeros resultados prometedores. D. A. Lidholm, A. R. Lohe y D. Hartl, de la Universidad de Harvard, han conseguido, con la ayuda de un elemento *mariner* activo, que produce la transposasa, introducir establemente en el genoma de *Drosophila* un elemento *mariner* inactivo; incluía éste tres genes entre las repeticiones invertidas:

se trata, pues, de un elemento de más de 13 kilobases de longitud, diez veces mayor que el elemento *mariner*. Parece así que *mariner* puede aceptar grandes fragmentos de ADN extraño, y ser integrado con la ayuda de un elemento activo. Aunque se trate de un experimento preliminar, abre la esperanza de que realmente *mariner* pueda ser utilizado como vector de integración general en un futuro no muy lejano. (*Jordi García-Fernández, Gemma Marfany, Jaume Baguñà y Emili Saló. Departamento de genética de la facultad de biología de la Universidad de Barcelona.*)

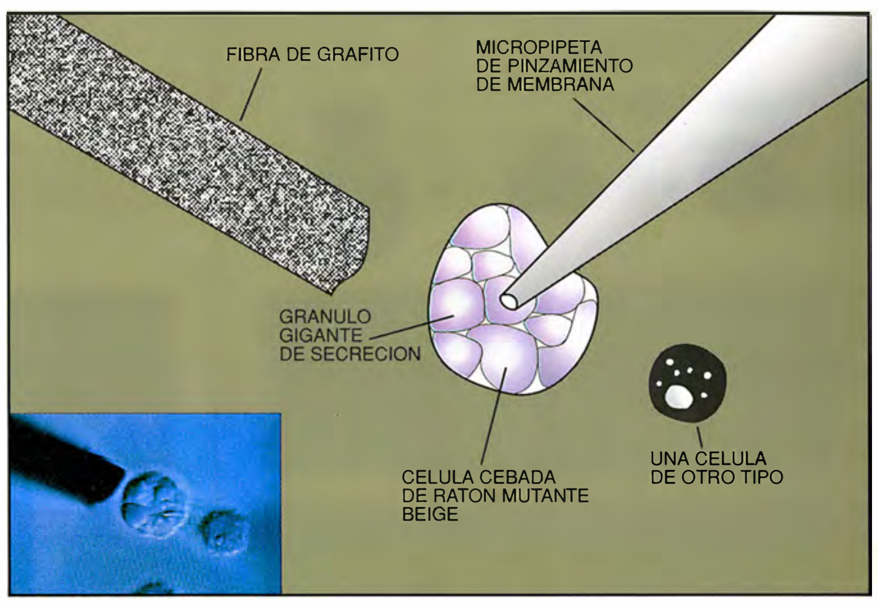
Comunicación entre neuronas

Exocitosis y sinapsis

La comprensión de la transmisión de información entre neuronas requiere un conocimiento profundo de cómo el neurotransmisor se almacena en las vesículas sinápticas que lo contienen y se libera a la hendidura sináptica tras la llegada de un potencial de acción.

Clásicamente se ha considerado que la cantidad mínima de información transmitida en una sinapsis se corresponde con un cuanto; es decir, la liberación mediante exocitosis de todas las moléculas almacenadas en el interior de una vesícula. Este proceso celular explosivo, en el que la vesícula se funde con la membrana presináptica y se incorpora en ésta, determina la desestructuración del terminal nervioso, que se restituye reinternalizando el exceso de membrana mediante la formación de vesículas endocíticas revestidas de clatrina. Aunque esta secuencia de eventos es la que se acepta que ocurre en la sinapsis con vesículas claras (que contienen como neurotransmisor acetilcolina, glutamato, GABA o aspartato), resulta difícil imaginar que la naturaleza no disponga de una forma alternativa de liberación de neurotransmisores más económica, que no implique la mezcla de componentes de la membrana y la desestructuración del terminal presináptico.

Ya en los años setenta y principios de los ochenta, un grupo de neurocientíficos italianos encabezados por Bruno Cecarrelli realizaron experimentos que sugerían que la liberación de neurotransmisor se producía por fusión vesicular completa según lo descrito por Heuser y Reese, únicamente cuando la estimulación del



*Modelo experimental utilizado para estudiar la dinámica de la exocitosis con técnicas electrofisiológicas. Una célula cebada del ratón mutante beige es intracelularmente dializada a través de una pipeta de pinzamiento de membrana (*sombra clara a la derecha en la imagen*). Con esta técnica se mide en tiempo real el incremento en superficie de la membrana celular que tiene lugar a causa de la exocitosis de vesículas. Las moléculas de serotonina liberadas durante este proceso (varios millones) se detectan con una fibra de grafito (8 micras de diámetro,* barra negra a la izquierda*) situada muy próxima de la membrana celular. La combinación de estas dos técnicas permite observar con una resolución temporal de milisegundos el fenómeno secretor*

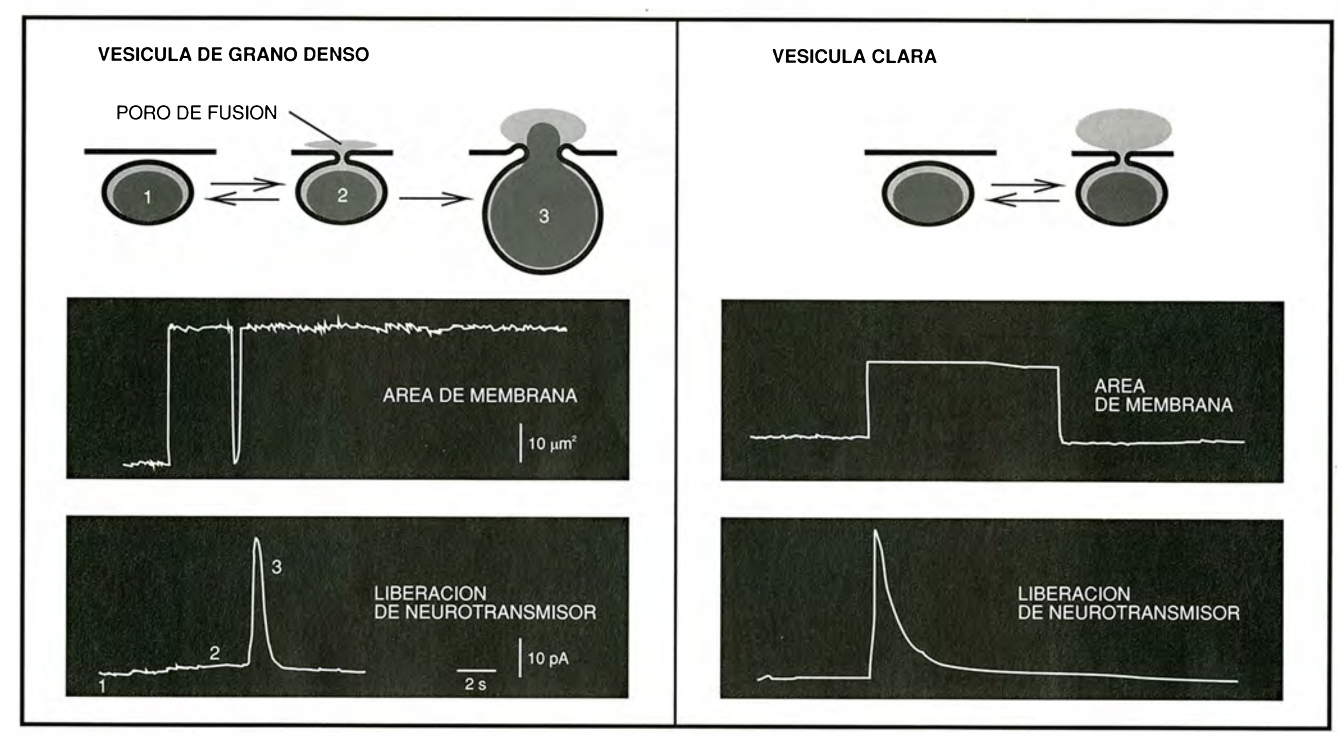
terminal era máxima. En condiciones fisiológicas, estos investigadores propusieron que una vesícula podría liberar su contenido durante una fusión transitoria. Por tanto, no habría desestructuración del terminal y se produciría un considerable ahorro de material y energía.

Sin embargo, esta teoría alternativa recibió escasa audiencia; probablemente, los experimentos realizados estaban más encaminados a demostrar las deficiencias de la teoría clásica que a aportar pruebas de la fusión transitoria de vesículas. En el mundo científico es bien sabido lo difícil que resulta rebatir una hipótesis alternativa utilizando las mismas herramientas que las que dieron lugar a la hipótesis original.

Una de las ventajas de introducir nuevas técnicas en un área determinada es que se obtienen resultados con rapidez y además, por lo general, insospechados. Este fue el caso con la exocitosis vesicular cuando se estudió desde el punto de vista electrofisiológico. Tras la introducción de la técnica del pinzamiento de membrana ("patch-clamp") se pudieron observar, con una resolución temporal de milisegundos, las vicisitudes que una única vesícula de secreción seguía hasta fusionarse con la membrana celular. Tras la fusión inicial de las membranas vesicular y plasmática, se produce la formación de un poro de fusión de dimensiones moleculares, que crece en diámetro para permitir el vaciamiento completo del grano secretor. Esta fase de expansión es muy variable y, en ocasiones, el poro puede cerrarse por completo. De esta forma, una vesícula queda conectada transitoriamente con la membrana plasmática sin producirse lo que conocemos como exocitosis. Esta fue la revolución conceptual introducida por la electrofisiología en 1984 en el campo de la secreción. Sin embargo quedaban abiertas varias cuestiones: ¿Encierra alguna significación funcional esta fusión reversible? O lo que es lo mismo, ¿existe secreción durante la fusión reversible? ¿Qué fracción del contenido se libera durante este período?

Los experimentos realizados por nuestro grupo han aportado una información que creemos valiosa, ya que demuestra la liberación de neurotransmisor por una vesícula mediante una fusión transitoria, sin ocurrir, por tanto, una desestructuración de la zona de la membrana plasmática donde se ha producido la fusión. Además, el estudio realizado permite seguir etapas del proceso de exocitosis hasta ahora sin explorar.

Con el equipamiento empleado para provocar el pinzamiento de



Etapas del proceso de liberación durante la exocitosis. A la izquierda, vesículas de grano denso y, a la derecha, vesícula clara. Las vesículas de grano denso pueden fundirse de forma transitoria con la membrana plasmática (2 en el dibujo)*. Durante este período, se libera al exterior una pequeña fracción del contenido. La reversibilidad de este fenómeno se muestra por la vuelta al nivel basal de la medida de superficie de membrana, indicio de que la vesícula se ha desconectado del medio extracelular* (1)*. La exocitosis de todo el contenido de la vesícula ocurre cuando se produce la expansión del poro de fusión y la salida masiva de serotonina desde la matriz del proteoglicano* (3)*. Esta liberación masiva va acompañada de un hinchamiento y expulsión de esta matriz al exterior, haciéndose por tanto irreversible el proceso. La vesícula sináptica clara, donde presumiblemente el contenido se encuentra en disolución, liberaría todo su contenido durante una fusión transitoria. El registro de liberación presume que el vaciamiento se produce a través de un poro de dimensiones constantes durante el proceso. Esta liberación es más económica y rápida que la que se produce con fusiones irreversibles, y que no implica la desestructuración de un terminal nervioso*

membrana, se pueden determinar electroquímicamente sustancias mediante la técnica de voltametría. Esto puede hacerse en células aisladas mediante la utilización de una fibra de grafito (de varias micras de diámetro) capaz de detectar catecolaminas. Si además de esta técnica que detecta sustancia segregada, se recurre al pinzamiento para medir el área de membrana, es posible obtener una información diversa e independiente del fenómeno secretor. En células cebadas, que contienen granos de secreción con catecolaminas, cuando la vesícula está conectada con la membrana plasmática en las primeras etapas de la exocitosis se detecta un incremento del área total de la membrana celular. Durante esta fase, se libera una fracción no superior al 10 % del contenido vesicular, resultado que demuestra una nueva forma fisiológica de segregar, ya que durante el tiempo que dura una fusión transitoria se libera un porcentaje pequeño del contenido. El remanente de neurotransmisor, atrapado en el proteoglicano que forma la matriz del grano, puede ser reutilizado posteriormente. Estas observaciones revelan además una función del proteoglicano hasta ahora insospechada.

La heparina, proteoglicano de los granos de secreción de los mastocitos, además de servir para concentrar el material de secreción durante el proceso de formación de una vesícula, constituye un elemento esencial que dosifica la cantidad liberada durante una fusión reversible con la membrana plasmática. Por tanto, una vesícula de grano denso no necesita una reinternalización posterior para liberar parte de su contenido al exterior. Este hecho explica también que el ciclo de formación de las vesículas de grano denso sea más lento que para las claras, ya que aquéllas se sintetizan en el soma y viajan por el axón hasta situarse en el terminal.

Para las vesículas claras la situación puede ser diferente. En éstas, el neurotransmisor parece hallarse en disolución; por tanto, la liberación está en función del volumen de la vesícula y del tiempo que permanece abierto el poro de fusión. Predicciones de un modelo realizado en nuestro laboratorio indican que una vesícula sináptica tardaría en abrir el poro unos 200 microsegundos, pero al tener estas vesículas sinápticas muy poco volumen, liberarían casi el 100 % de su contenido, dando lugar a una liberación cuántica.

Nuestros experimentos han sido realizados en una preparación que permite, por su fácil manipulación, estudiar muy finamente el fenómeno secretor. Estos resultados no tienen por qué ser ciertos para una sinapsis real. Si en el futuro se demostrara esta hipótesis en un terminal sináptico habríamos conseguido desenmascarar un mecanismo básico celular que, por el difícil acceso para su estudio, ha sido objeto de debate entre la comunidad de neurocientíficos. (*Rafael Fernández Chacón y Guillermo Alvarez de Toledo, del departamento de fisiología médica y biofísica de la Facultad de Medicina de Sevilla, y Julio M. Fernández, del departamento de fisiología y biofísica de la Clínica Mayo.*)

Fluidos electrorreológicos

Algunos líquidos se solidifican instantáneamente cuando se les somete a un campo eléctrico. Con estos materiales proteicos podrían fabricarse máquinas más rápidas y adaptables

Thomas C. Halsey y James E. Martin

T-1000, el robot casi indestructible de la película "Terminator 2: el día del juicio final", se transformaba a placer, y de líquido se volvía sólido. Alcanzado por una bala, su piel de metal líquido cubría el orificio; despedazado, se fundía y recuperaba su forma original. Cabe esperar que los fluidos electrorreológicos lleguen a tener un poco de tamaña capacidad de adaptación.

Los fluidos electrorreológicos cambian su forma en presencia de campos eléctricos. A tenor de la intensidad del campo al que se les someta, fluirán libres como el agua, se derramarán despacio como la miel o se solidificarán como la gelatina. Esas sustancias pueden pasar de un estado a otro en milisegundos, y son fáciles de producir; consisten en partículas microscópicas suspendidas en un líquido aislante; pero no están listas para las aplicaciones comerciales. Tienden a presentar algunos problemas, pues son de estructura débil en su estado sólido, abrasivos en estado líquido y químicamente inestables a temperaturas elevadas.

En los últimos tiempos se fabrican con ingredientes menos abrasivos y químicamente más estables. Su debilidad estructural, sin embargo, sigue siendo un grave inconveniente. Para diseñar fluidos electrorreológicos que sean de utilidad práctica habrá que contar con un conocimiento muy completo de las interacciones eléctricas entre partículas en suspensión que dan lugar a sólidos muy fuertes.

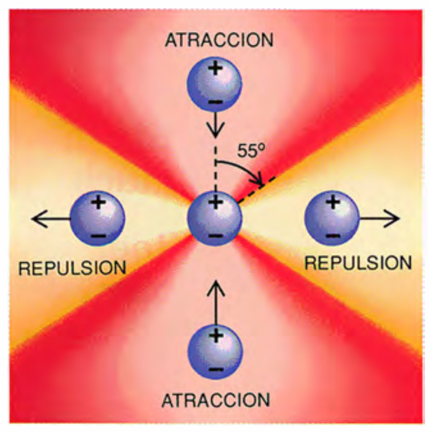
El atractivo de estas sustancias se debe no sólo a sus interesantes propiedades físicas, sino también a su complejidad. Las partículas de los fluidos electrorreológicos se organizan en estructuras muy complejas y diversas. En un caso extremo, cuando el fluido fluye con libertad, las partículas se mueven independientemente unas de otras; en el otro, su solidificación, se unen entre sí y forman cadenas delgadas y columnas muy gruesas, perceptibles a simple vista.

El estudio de los fluidos electrorreológicos aborda el comportamiento de la materia en un estado intermedio entre el líquido y el sólido ordinarios; el comportamiento de aquélla difiere mucho del observado en líquidos y sólidos típicos. Se ha avanzado bastante en el conocimiento de la interacción entre partículas de esos estados insólitos. Falta por ver si ello ayudará a la elaboración de fluidos más resistentes.

El interés por los efectos electrorreológicos nació hacia 1947, cuando Willis M. Winslow obtuvo, al cabo de ocho años de observaciones, la primera patente de un fluido electrorreológico. Muy pronto se descubrió que algo tan simple —y comestible— como la dispersión de almidón de maíz en aceite de maíz presentaba el efecto electrorreológico; para ello había que someterla a un campo eléctrico intenso, de unos 1000 volts por centímetro. Una manera de producir el efecto, por ejemplo, consiste en colocar la sustancia entre dos placas metálicas separadas entre sí por un milímetro y darles a los electrodos un potencial de 1000 volts. Quizás este voltaje parezca elevado, pero la energía requerida para generarlo es pequeña. Por tratarse de un aislante, ninguna corriente eléctrica apreciable cursa por el fluido. Por consiguiente, la carga existente en las placas origina rápidamente un voltaje elevado, tal y como se acumulan con facilidad miles de volts de electricidad estática en la piel de una persona.

La patente de Winslow causó excitación. El futuro de los fluidos

THOMAS C. HALSEY y JAMES E. MARTIN han hecho en los últimos años importantes contribuciones a la electrorreología. Desde 1987 Halsey, doctor en física por Harvard, es profesor del Instituto James Franck de la Universidad de Chicago. Martin es miembro del personal técnico de los Laboratorios Nacionales de Sandia, a los que se incorporó en 1981 tras obtener en la Universidad de Washington el título de doctor en química física.

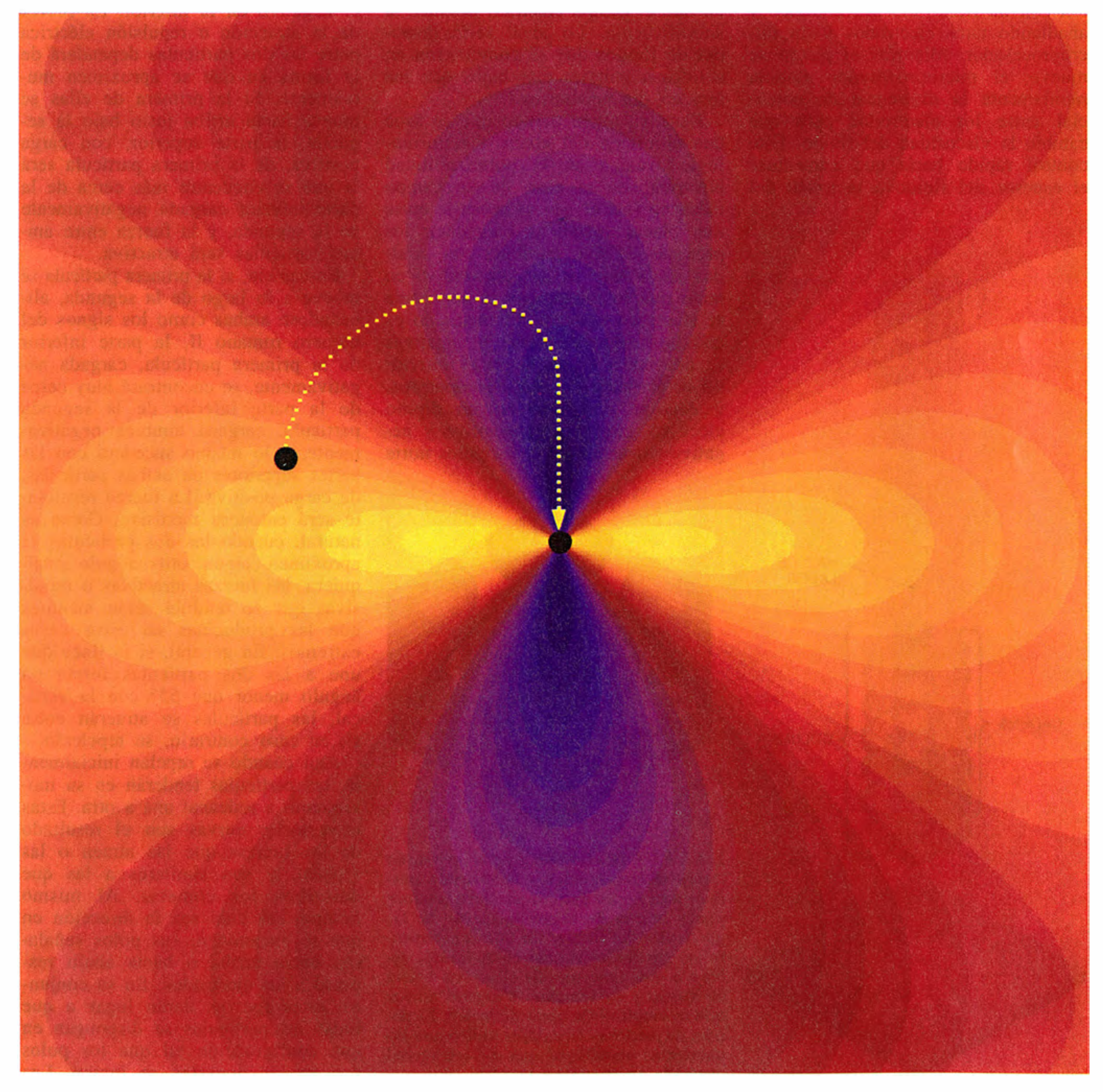


1. EN LA INTERACCION entre partículas cargadas reside la clave del efecto electrorreológico. Una partícula con un polo positivo y un polo negativo puede atraer o repeler a otra partícula polarizada de la misma forma (*arriba*). Cuando las partículas están enfrentadas, las fuerzas de repulsión entre polos iguales las separan; cuando están alineadas verticalmente, la atracción entre polos opuestos tiende a unirlas. En la figura de la derecha, una partícula polarizada que se encuentre en la zona repulsiva (*naranja*) de otra partícula caerá en la zona atractiva (*púrpura*) describiendo un segmento de espiral. Si muchas partículas polarizadas en suspensión en un fluido interaccionan de este modo, formarán cadenas, y el fluido mostrará el efecto electrorreológico; en otras palabras, el fluido se apelmazará y podría incluso solidificarse.

electrorreológicos parecía muy brillante. Los ingenieros de automóviles podían imaginar, por ejemplo, que con ellos podrían hacer embragues electrorreológicos. El fluido contenido en el interior de un embrague así se acoplaría a la transmisión del motor, que proporciona la energía a las ruedas. Al solidificarse, el fluido forzaría el giro de la transmisión; cuando se licuara, haría que el motor se desconectara de la transmisión y rotara libremente, como sucede cuando el automóvil se encuentra en punto muerto. Pocas partes de este embrague se desgastarían o estropearían. Y, dado que su tiempo de respuesta sería tan sólo de algunos milisegundos, actuaría mucho más deprisa que los embragues corrientes, puramente mecánicos. Se esperaba también que gracias a los fluidos electrorreológicos pudiesen construirse sistemas hidráulicos sin válvulas, en los que la solidificación del fluido produciría un corte en el flujo a través de una fina sección de la conducción.

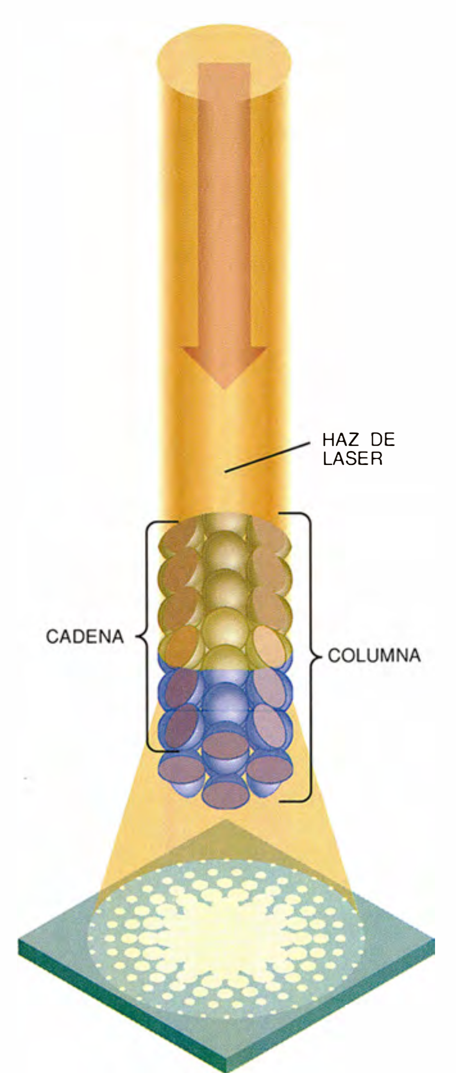
Aunque estas ideas conservan aún su interés, las posibilidades realmente apasionantes de los fluidos electrorreológicos serían las que dimanasen de su utilización en dispositivos adaptables que sacasen partido de la variación continua de la viscosidad del flujo. Mediante la aplicación de un campo eléctrico podemos controlar el flujo de un fluido electrorreológico; en ese fenómeno se basa la idea del amortiguador adaptativo, que ha despertado el interés de la industria del automóvil y de los ferrocarriles de levitación magnética. (Aunque estos trenes no ruedan sobre carriles, la adopción de esos amortiguadores reduciría los efectos de arranques y paradas bruscos.)

Un amortiguador ordinario consiste en un cilindro que en su interior lleva un pistón que, al ser comprimido, bombea un líquido viscoso a través de un orificio de pequeño diámetro. El movimiento lento, pegajoso, del fluido absorbe los impactos; el líquido retorna más deprisa por un agujero mayor al amortiguador, mientras éste recupera su estado inicial. El inconveniente reside en que la viscosidad del aceite es muy sensible a la temperatura; en un día frío se hace más viscoso, y el amortiguador se



endurece un poco. Por otra parte, debido a que el aceite se calienta y se hace menos viscoso con las compresiones repetidas, la capacidad de amortiguamiento del amortiguador casi desaparece cuando se circula por una carretera larga y llena de baches, es decir, precisamente cuando más se la necesita. Para compensar estas dificultades se puede instalar un sistema mecánico que ajuste el tamaño del orificio del amortiguador en caso de que sea necesario.

Los fluidos electrorreológicos ofrecen la posibilidad de fabricar amortiguadores cuyos tiempos de respuesta sean del orden de milisegundos y que no requieran ajustes mecánicos. Podrían construirse llenando un pistón con un fluido electrorreológico y añadiendo unos electrodos y un microprocesador. Mientras el pistón se mueve, el microprocesador modula rápidamente la diferencia de potencial entre los electrodos para que cambie la viscosidad del fluido. Este control rápido haría que aumentase el espesor del fluido a la mitad del recorrido de manera que se amortiguaran los efectos del bache. Podría hacerse entonces que el fluido disminuyese su viscosidad para que la recuperación fuese más veloz. Por tanto, un mismo amortiguador podría adaptarse a una gran variedad de vehículos y condiciones de trabajo.



En cualquier caso, los fluidos electrorreológicos existentes en la actualidad fallan cuando se los somete a castigos severos. Los compuestos suelen ser demasiado blandos en cuanto sólidos, y los elevados voltajes necesarios para solidificarlos, cuando se aplican frecuentemente, pueden calentar los ingredientes volátiles del líquido y separarlos de la mezcla. Para resolver estos problemas, estamos investigando la forma en que el campo eléctrico produce la solidificación. Lo ideal sería disponer de fluidos que se convirtieran en sólidos a voltajes más bajos que los hoy en día necesarios.

Hace ya algún tiempo que se sabe que el origen del efecto electrorreológico radica en la polarizabilidad eléctrica. En el seno de un campo eléctrico (así el que se produce entre dos placas metálicas cargadas), los protones de una partícula son atraídos hacia uno de los electrodos, en tanto que los electrones lo son hacia el electrodo opuesto. El resultado es que las cargas positivas y negativas se desplazan un tanto en el interior de la partícula en sentidos opuestos, y ésta se convierte en un dipolo eléctrico, cuyos polos positivo y negativo son análogos a los polos norte y sur de un imán. La intensidad de este efecto varía según el valor de la polarizabilidad eléctrica de la sustancia de que se trate; si es una cifra elevada, grandes cantidades de carga eléctrica se desplazarán grandes distancias hacia los polos opuestos de las partículas, pero si la polarizabilidad es pequeña las partículas apenas responderán a la aplicación de un campo eléctrico externo.

2. LA LUZ DE LASER que atraviesa un fluido electrorreológico solidificado produce una figura que proporciona algunas pistas acerca de la organización de las partículas del fluido. En este experimento las partículas actúan como lentes, debido a que cada una de ellas está hecha de vidrio y su tamaño es mucho mayor que la longitud de onda de la luz. El patrón de manchas circulares indica que las partículas constituyen una red tetragonal centrada en el cuerpo (*arriba*).

Cuando el fluido contiene muchas partículas polarizadas, las interacciones eléctricas se complican. La situación más sencilla es la de dos partículas sometidas a un campo eléctrico intenso; por razones de claridad, supondremos que tienen el polo positivo en la parte superior y el negativo en la inferior. La fuerza de la atracción o repulsión eléctrica entre las dos partículas dependerá de la forma en que se aproximen mutuamente. Si la primera de ellas se mueve hacia arriba justo bajo la segunda, la parte superior, con carga positiva, de la primera partícula será la que se encuentre más cerca de la parte inferior cargada negativamente de la segunda, y la fuerza entre ambas partículas será atractiva.

En cambio, si la primera partícula se mueve a lo largo de la segunda, alineándose ambas como los signos del número romano II, la parte inferior de la primera partícula, cargada negativamente, se encontrará muy cerca de la parte inferior de la segunda partícula, cargada también negativamente, y lo mismo sucederá con las partes superiores de ambas partículas, de carga positiva. La fuerza resultante será entonces repulsiva. Como es natural, cuando las dos partículas se aproximen según otro ángulo cualquiera, las fuerzas atractivas o repulsivas que se tendrán serán menores que las producidas en estos casos extremos. En general, si la línea que une a las dos partículas forma un ángulo menor que 55º con la vertical, las partículas se atraerán entre sí; en caso contrario, se repelerán.

Aun cuando se repelan inicialmente, las partículas tenderán en su movimiento a rodearse una a otra. Estas trayectorias curvas son el resultado de las fuerzas que las atraen o las repelen, y son similares a las que describen los cometas. Al mismo tiempo, sea cual sea la dirección en que se encaminen, sus polos señalarán hacia arriba o hacia abajo respecto a los electrodos. En su conjunto, estas fuerzas darán lugar a que todas las partículas se dispongan en una configuración tal que los polos con cargas opuestas se junten. Las

fuerzas atractivas predominan entonces, y las partículas se pegan. Las partículas sucesivas se alinean extremo con extremo formando largas cadenas, a modo de perlas en un collar. Este fenómeno es análogo al alineamiento de las limaduras de hierro a lo largo de las líneas del campo magnético de un imán. Las cadenas de partículas crecen rápidamente de un extremo al otro del recipiente que contiene el fluido electrorreológico; a la formación de estas cadenas se debe la solidificación del fluido.

Algunas partículas crean con facilidad estas cadenas cuando están en suspensión en un tipo de fluido, pero no en otro. Aún ha de ponerse orden en la confusión de los detalles. Una complicación adicional estriba en que las partículas están inmersas en líquidos cuyas moléculas también se pueden polarizar. Si la polarizabilidad del líquido es exactamente la misma que la de las partículas, la polarización del fluido enmascarará la de las partículas y no se formarán las cadenas. En general, los fluidos electrorreológicos trabajan mejor cuando las partículas sólidas se polarizan con mayor facilidad que las moléculas del fluido.

Sin embargo, la formación de las cadenas es tan sólo un paso intermedio en el desarrollo de la estructura de los fluidos electrorreológicos. Las cadenas individuales se mueven con lentitud hacia las cadenas paralelas más próximas para crear columnas más gruesas, que, a su vez, se unen con otras para formar nuevas columnas más gruesas todavía, y así sucesivamente. ¿Cuál es la estructura sólida que se obtiene en última instancia? Trabajos teóricos y experimentales recientes han dado respuesta a esta pregunta.

En primer lugar, un análisis de los complejos campos eléctricos que un número grande de partículas crea a su alrededor ofrece algunas pistas sobre qué estructura cabe esperar. Como ya hemos visto, las partículas dipolares se repelen entre sí cuando se encuentran una junto a otra, de suerte que, a primera vista, la formación de columnas constituidas por cadenas parece un tanto misteriosa. ¿Por qué no se desintegran en sus cadenas constituyentes? Porque una partícula es atraída a una cadena próxima o repelida por ella no sólo por la fuerza que originan unas cuantas partículas de la cadena que estén cerca de ella, sino también por efecto de la fuerza que originan muchas otras partículas de la misma cadena, bien distantes de la partícula atraída o rechazada. Las columnas se mantienen unidas entre sí porque la fuerza dipolar es de largo alcance y las partículas responden a la suma de fuerzas de los demás dipolos del fluido.

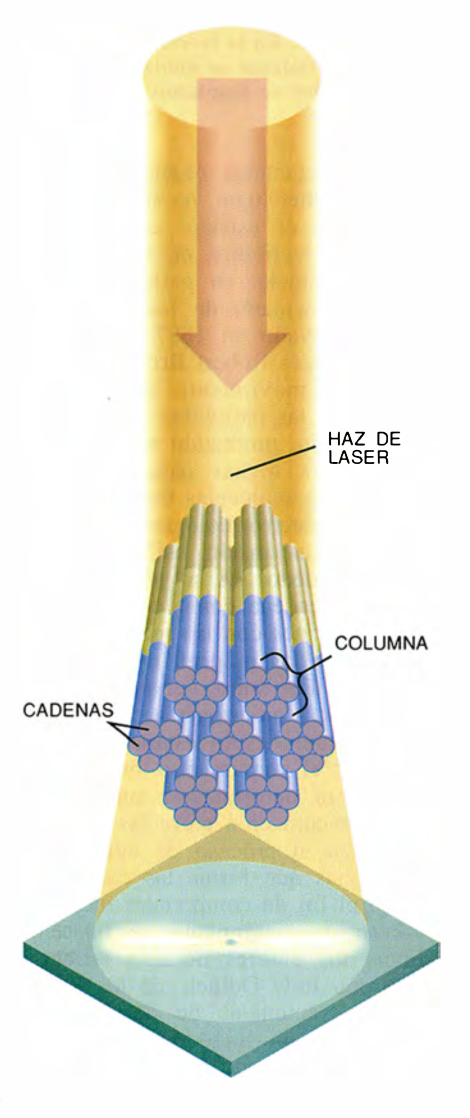
Para comprender el motivo en virtud del cual las columnas se mantienen unidas, consideremos la existencia de una partícula de prueba situada cerca de una cadena. La partícula de prueba será repelida por la partícula más próxima de la cadena, de la misma forma que dos partículas próximas se repelen entre sí. Pero esta misma partícula test será atraída por las partículas situadas mucho más arriba y mucho más abajo en esa misma cadena, pues estará, respecto a la mayoría de las partículas situadas entre los dos extremos de la cadena, en la zona atractiva delimitada por el ángulo de 55 grados. Para ser todavía más precisos, la partícula de prueba será llevada a una posición ligeramente por encima de la posición de una partícula de la cadena y ligeramente por debajo de otra. En consecuencia, si se colocaran muchas de estas partículas test en las proximidades de la cadena, serían atraídas hacia ella y entre sí, y formarían una segunda cadena, y luego una tercera, y así sucesivamente. De este modo, las fuerzas dipolares existentes entre las partículas hacen que las cadenas constituyan columnas en las que las partículas de cadenas adyacentes se van disponiendo de forma alterna.

Tian-jie Chen, Robert N. Zitter y Rongjia Tao, de la Universidad del Sur de Illinois, han confirmado hace poco la existencia de estas estructuras. Utilizaron un fluido electrorreológico formado por esferas de vidrio —cuyo diámetro, bastante grande, era de 40 micras— suspendidas en un aceite de silicona. Las cadenas se constituían en cuanto se aplicaba un campo eléctrico. Al cabo de algunos minutos, se agregaban construyendo columnas de sección aproximadamente circular y con un diámetro de unos seis milímetros.

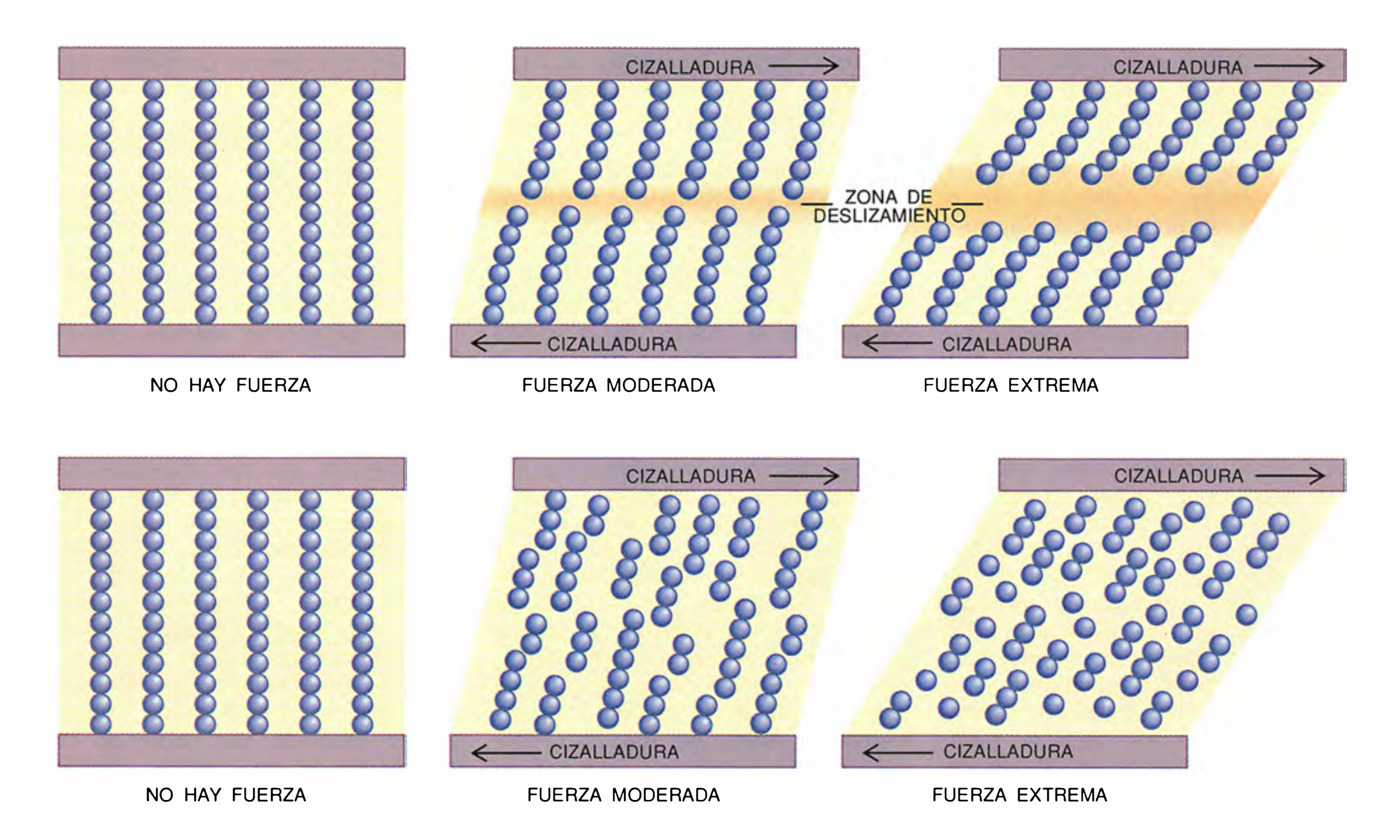
Para determinar la estructura interior de estas columnas, aprovecharon las propiedades de focalización de las esferas de vidrio y consideraron que las columnas eran pilas de lentes capaces de transmitir la luz. Esta se propagaba de esfera en esfera hasta que salía de la columna. La última capa de esferas actuaba como un conjunto de fuentes luminosas, y creaba un patrón de marcas solapadas. Del análisis de esta figura, el grupo de la Universidad del Sur de Illinois infirió que su fluido electrorreológico solidificado tenía una estructura tetragonal centrada en el cuerpo. Pues bien, en ella las partículas pertenecientes a cadenas adyacentes estaban colocadas, en efecto, de manera alterna.

Las fuerzas atractivas entre las cadenas tienen intensidad suficiente para crear una red tridimensional de este tipo, pero no para dar cuenta de la agregación, bastante rápida (del orden de algunos minutos), observada por el grupo de la Universidad del Sur de Illinois. Al parecer, la realidad es más complicada que el escueto análisis de las fuerzas eléctricas.

En los experimentos, las columnas se forman con mucha mayor rapidez que lo esperado por culpa de las limitaciones de las cadenas. Existen al menos dos razones por las que las cadenas de partículas no son estruc-



3. ESTA FIGURA EN OCHO aparece cuando un haz luminoso atraviesa un fluido electrorreológico formado por partículas cuyo tamaño es del orden de la longitud de onda de la luz. Pone de manifiesto la organización columnar de las partículas. A medida que la distancia que separa unas columnas de otras aumenta, la figura en ocho se hace más pequeña.



4. SE HAN ESBOZADO DOS TEORIAS para describir cómo las cadenas de partículas impiden el flujo de los fluidos electrorreológicos. En la teoría de Klingenberg y Zukoski (*fila superior*), las cadenas se doblan cuando sus extremos se unen a electrodos que se desplazan en cizalladura. Dichas cadenas se rompen en el centro del fluido, y las dimensiones de esta "zona de derrame" aumentan a medida que lo hace la fuerza de cizalladura. En la teoría de Halsey, Martin y Adolf (*fila inferior*), las cadenas flotan en el seno del fluido. Cuando la fuerza de cizalladura aumenta, las cadenas se inclinan y rompen.

turas perfectamente ordenadas y rectas. En primer lugar, no siempre pueden cubrir el espacio comprendido entre los electrodos; en segundo lugar, las modela, en parte, el movimiento browniano de las partículas. Este, observado en 1827 por el botánico escocés Robert Brown, consiste en un movimiento incesante y errático de las partículas suspendidas en un fluido, producido por las colisiones entre dichas partículas y el enjambre de moléculas del fluido. En un fluido electrorreológico, las partículas en suspensión bailan caóticamente alrededor de su posición media en la cadena como consecuencia de los choques con las moléculas del fluido, que las golpean en todas direcciones. Por tanto, aunque la cadena sea recta en promedio, su forma en un instante dado estará distorsionada por el movimiento browniano. Esta ligera deformación aumenta la fuerza de atracción entre las cadenas y cataliza el proceso de agregación de cadenas que forma las columnas.

Con el fin de comprender mejor el proceso de crecimiento de una columna, los autores de este artículo, junto con Judy Odinek, de los Laboratorios Nacionales de Sandia, nos valimos de un método óptico diferente del empleado por Chen, Zitter y Tao. En lugar de dirigir un haz de luz a lo largo de cadenas constituidas por esferas de vidrio más bien grandes, lo enviamos en una dirección perpendicular y utilizamos esferas mucho menores, cuyo diámetro era inferior a un nanómetro. La luz que difunden las columnas hechas por estas partículas informa sobre el espaciado y la anchura de las columnas. La luz emergente dibuja una imagen en ocho; al principio es grande y difusa, pero a medida que las columnas van adquiriendo mayor grosor y aumenta y la distancia entre ellas, la luz que atraviesa el fluido encuentra menos obstáculos y, en consecuencia, la difusión disminuye y los lóbulos del ocho se tornan menores y brillantes.

Esta es, en gruesos trazos, la regla que nos permitió interpretar las imágenes luminosas vistas en nuestros experimentos. Cuando el campo eléctrico está desconectado y no hay cadenas o columnas en la muestra, la luz se difunde de forma homogénea. Pero cuando se aplica el campo, la luz que emerge de la muestra empieza a concentrarse en los dos lóbulos. A medida que transcurre el tiempo, la luz es cada vez más brillante cerca del centro del ocho. Este brillo indica que hay menos difusión conforme las columnas se van haciendo más gruesas y queda más espacio libre entre ellas. Al principio, el crecimiento de las columnas ocurre muy rápidamente, pero al cabo de algunos minutos la progresión se detiene casi por completo porque la fuerza atractiva que existe entre las columnas es demasiado débil para que se dé un crecimiento continuo. Habida cuenta de que los cálculos arrojan que el fluido en solidificación podría ir haciéndose más resistente con el grosor creciente de las columnas, estas mediciones muestran que es posible que el mantenimiento del campo eléctrico durante períodos de hasta algunos minutos mejore las propiedades mecánicas de los fluidos electrorreológicos.

Al fin y al cabo, éstos han de soportar fuerzas mecánicas. Conocer su estructura estática no es suficiente; hay también que saber qué le pasa a esa estructura cuando se la comprime o estira. Estos temas corresponden al dominio de la reología, la disciplina que estudia las propiedades del flujo de los materiales. (Casi todos los materiales, incluso los sólidos, fluyen cuando sufren presiones suficientemente altas, aunque a veces lo hacen en una cuantía imperceptible.)

Por norma, mientras los materiales

rígidos fluyen muy poco, los más débiles lo hacen al menor intento. Una variable que afecta a la velocidad con que fluye un fluido es la tensión, o fuerza, que se le aplica. En el caso de fluidos simples como el agua, la velocidad de flujo es proporcional a la fuerza; el agua fluye con mayor velocidad cuando aumenta la presión que le aplicamos con una bomba. Por otro lado, la velocidad de flujo es inversamente proporcional a la viscosidad del fluido. Un aceite muy espeso, por ejemplo, sometido a cierta tensión fluirá, en comparación con el agua, muy despacio.

Pero los fluidos electrorreológicos en un campo eléctrico no son tan simples. Su comportamiento semeja el de cierta familia de materiales, los plásticos de Bingham. Por debajo de un umbral de tensión, no fluyen en absoluto; por encima, la velocidad de flujo aumenta de forma proporcional a la diferencia entre la fuerza aplicada y el valor de la fuerza umbral. Cada mañana nos encontramos con un plástico de Bingham: la pasta dentífrica. Este tipo reológico crea el flujo de "tapón" que nos permite exprimir un "tapón" cilíndrico de pasta quieta sobre un cepillo de dientes. Como el dentífrico, los fluidos electrorreológicos resisten hasta que la fuerza adquiere cierta magnitud, y fluyen cuando la sobrepasa.

En un fluido electrorreológico suele originarse una tensión en cuanto los electrodos se mueven —digamos que hacia la derecha una de las placas, hacia la izquierda la otra—. Esta tensión recibe el nombre de fuerza de cizalladura. Si es pequeña, las cadenas de partículas del fluido se inclinarán y estirarán un tanto, sin llegar a romperse; disminuirá, no obstante, la fuerza atractiva entre las partículas, pues al inclinarse dejan las cadenas de estar alineadas en el campo eléctrico justo de arriba abajo. Al irse abatiendo las cadenas, las partículas que las forman irán estando cada vez más lado con lado. Cuando la inclinación de las cadenas es excesiva, las partículas se salen de la región en la que interaccionan mutuamente, las cadenas se rompen y el material fluye. La tensión existente en ese momento se denomina límite elástico ("yield stress").

En el embrague electrorreológico y aplicaciones similares, la maximización del límite elástico o tensión crítica importa mucho. Un fluido cuyo límite elástico sea alto soportará un par o fuerza de rotación elevados antes de que comience el flujo y el embrague se suelte. Una forma de aumentar la resistencia del fluido a la tensión consiste en aumentar el voltaje aplicado. La separación entre las cargas positivas y negativas de los dipolos de las partículas es proporcional al voltaje; la fuerza atractiva lo es al cuadrado de la separación entre las cargas. En consecuencia, la tensión crítica crece con el cuadrado del voltaje aplicado. Sin embargo, cuanto mayor sea éste, mayor será el consumo de energía, con el consiguiente calentamiento del fluido electrorreológico. Si el fluido se calienta demasiado, se descompondrá. De aquí que, cuando se elaboran fluidos electrorreológicos resistentes, uno de los objetivos a alcanzar es la minimización del voltaje necesario para alcanzar un determinado límite elástico.

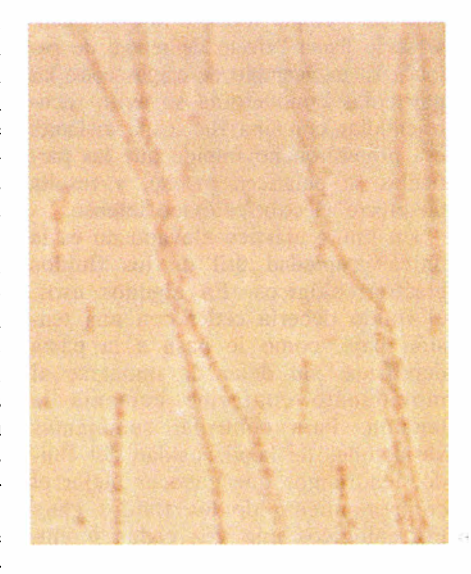
Dicho voltaje depende en gran medida de la polarizabilidad de las partículas. Hasta hace unos años, se suponía que la resistencia de un fluido solidificado no aumentaba mucho con la polarizabilidad. Hoy sabemos que esta suposición no era correcta gracias a los estudios sobre partículas cerámicas altamente polarizables llevados a cabo por Douglas B. Adolf, Robert A. Anderson, Terry J. Garino y Bradley G. Hance, del Laboratorio Nacional de Sandia, quienes demostraron que la resistencia aumenta de forma espectacular a medida que aumenta la polarización. Se espera poder obtener fluidos electrorreológicos muy resistentes por medio de partículas altamente polarizables.

La conductividad eléctrica también cuenta. La diferencia entre la conductividad de las partículas y la del disolvente líquido se acentúa si el campo eléctrico se aplica durante más de una centésima de segundo. Consideremos unas partículas no conductoras suspendidas en un líquido débilmente conductor. En cuanto se aplica el campo, las partículas se polarizan, pero también fluyen por el líquido cargas eléctricas, que se acumulan sobre las superficies de las partículas polarizadas. Poco tiempo después, las interacciones entre las partículas ya no vendrán determinadas por su polarización intrínseca, sino por las nubes de cargas eléctricas que rodearán a todas las partículas del líquido. Aunque la fuerza principal existente entre las partículas seguirá siendo dipolar, difiere el origen microscópico de la misma y podría diverger también el límite elástico, o tensión crítica.

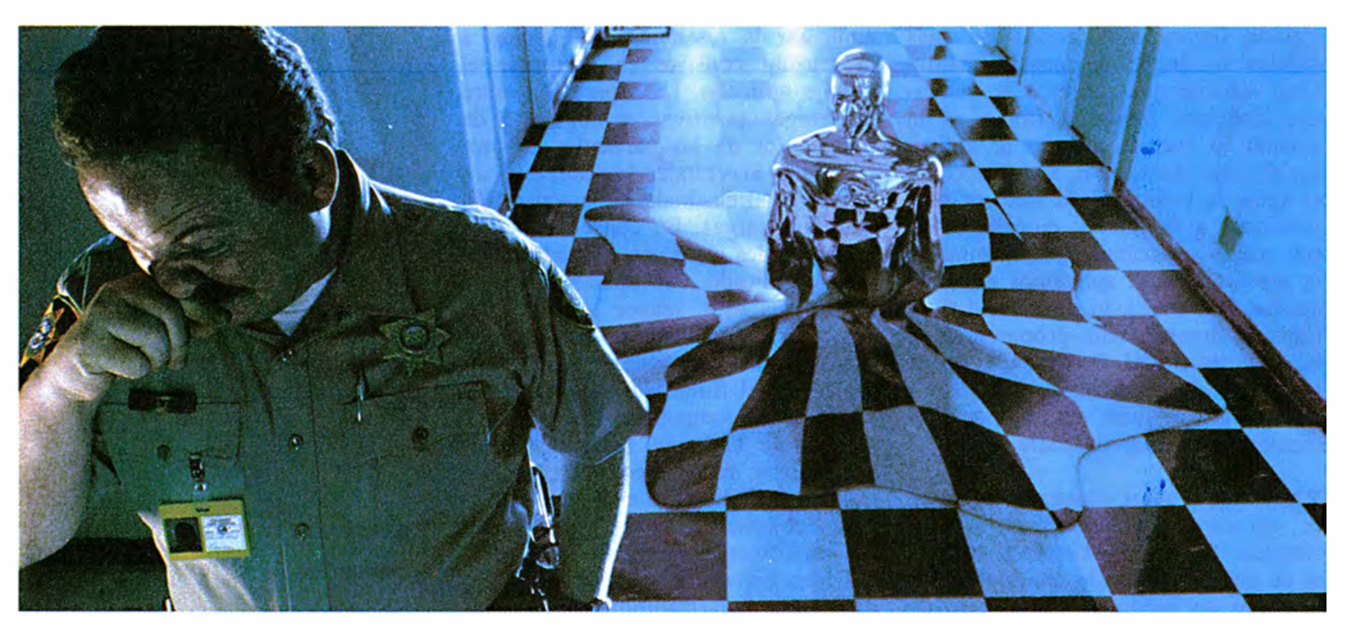
Cuando hay partículas conductoras en un líquido aislante surgen otros problemas; al polarizarse aquéllas, los electrones no sólo se desplazan dentro de las moléculas, sino que se trasla-







5. LA SOLIDIFICACION se produce por etapas cuando se aplica un campo eléctrico a un fluido desordenado (*arriba*). Las partículas sólo necesitan algunos milisegundos para formar cadenas largas de "perlas" (*centro*). Algunos segundos más tarde, las cadenas se unen y forman columnas (*abajo*). Se ven aquí partículas de sílice cuyo tamaño es del orden del nanómetro.



6. EL MATERIAL ADAPTATIVO supremo en la película "Terminator 2": el robot se camufla en un suelo de mosaico con una presta transformación de sólido en líquido. Los fluidos electrorreológicos de hoy no llegan, ni mucho menos, a tanto.

dan de unas moléculas a otras a lo largo de la partícula, con lo que se producen una polarización y unas fuerzas atractivas intensas. Pero si las partículas están en contacto, la carga fluirá entre ellas. Entonces, una partícula tendrá una carga positiva neta, otra estará cargada negativamente, y en lugar de unirse, se moverán hacia electrodos opuestos, dado que éstos ejercerán sobre ellas una atracción más potente que cualquier pequeña partícula individual. Este fenómeno ha sido observado en suspensiones de partículas conductoras, e informalmente se le llama "efecto de rebote de pelota". El intercambio de cargas entre las partículas conductoras se evita recubriéndolas con una fina capa aislante; esa protección no impide que las partículas se polaricen mucho, y resulta un efecto electrorreológico intenso.

Un límite elástico elevado no es la única propiedad útil de los fluidos electrorreológicos. En algunos usos, el fluido debería ceder con una tensión baja, como le pasa a la pasta dentífrica, sin dejar de oponerse al movimiento conforme aumenta la tensión. Para controlar semejantes variaciones de la viscosidad del fluido, tendríamos que conocer mejor el comportamiento de los fluidos electrorreológicos una vez ceden y empiezan a fluir. Por eso, los autores de este artículo y otros equipos de investigación estudiamos qué tipos de estructuras van surgiendo a medida que los fluidos sufren mayores tensiones. Examinamos la forma en que tales estructuras inhiben el flujo del líquido en el que están suspendidas y cómo este flujo distorsiona y debilita las estructuras sólidas para que el líquido siga fluyendo.

No existe una teoría general del fenómeno. Un grupo ha propuesto un modelo de flujo electrorreológico basado en la observación de un fluido de almidón de maíz; el nuestro, que experimenta con otros fluidos, tiene una explicación diferente de su flujo viscoso y resistente.

Daniel J. Klingenberg, actualmente en la Universidad de Wisconsin, y Charles F. Zukoski, de la Universidad de Illinois, investigaron el flujo de un fluido electrorreológico de almidón de maíz bajo tensiones superiores a la tensión crítica. Hallaron que el desplazamiento en cizalladura de los electrodos originaba dos tipos de estructuras: cerca de las placas se formaban columnas inclinadas de partículas y en la zona central entre ellas se constituía una "zona de derrame", donde las cadenas se rompían y el fluido se movía con libertad. A medida que la cizalladura aumentaba, la anchura de la zona de derrame se expandía y lubricaba el movimiento relativo de las columnas inclinadas adheridas a las placas.

En colaboración con Adolf, hemos propuesto una explicación alternativa de cizalladura en los fluidos electrorreológicos, según la cual la adhesión de las columnas a los electrodos no es dominante. Si las columnas tienen libertad para derivar, las fuerzas atractivas entre las partículas tenderán a alinear las columnas en una dirección perpendicular a los electrodos. En cambio, el fluido que fluye intenta girarlas de manera que queden paralelas a los electrodos y a la dirección del flujo. Estas fuerzas de viscosidad proceden del flujo del fluido. Cuando la inclinación de las columnas alcanza cierto ángulo, las fuerzas de viscosidad que intentan que las columnas sean paralelas al flujo contrarrestarán las fuerzas eléctricas que hacen por mantenerlas en una dirección perpendicular. Esperamos que se vean estas columnas inclinadas por todo el fluido cuando éste cede a la tensión de cizalladura y empieza a fluir.

Esperamos también que la longitud de las columnas o cadenas disminuya a medida que la velocidad de cizalladura aumenta. Debido a la superficie mayor de las cadenas largas, las fuerzas de viscosidad actúan con mayor intensidad sobre ellas que sobre las cortas, hasta el punto de que las cadenas muy largas girarán más allá del ángulo límite de atracción de las partículas entre sí. En consecuencia, se romperán cuando las partículas empiecen a repelerse. Este fenómeno impone un límite superior a la longitud de las cadenas que pueden formarse para determinada velocidad de cizalladura en cierto campo eléctrico. Sin embargo, basta con las cadenas relativamente cortas que sí aparecen para que se produzca un aumento espectacular de la viscosidad del fluido. La situación es muy similar a la que se produciría si se bombease agua por una conducción llena de agujas de pino. Que el agua tenga que abrirse paso a través de una fina urdimbre incrementa la fuerza que se necesita para lograr cierta velocidad de flujo; por tanto, la combinación

de agua y agujas tendrá una viscosidad elevada, justo lo que sucede en los fluidos electrorreológicos más allá de la tensión crítica.

Es probable que, para explicar el comportamiento de muchos fluidos electrorreológicos, hayamos de conjugar el modelo de Klingenberg con nuestra teoría. En las proximidades de los electrodos se forma una región hasta cierto punto estática, similar al estado de reposo de la red electrorreológica solidificada; en la región intermedia, esta estructura se rompe en cadenas de partículas más cortas e inclinadas.

Los fluidos electrorreológicos existentes en la actualidad ya no son las mezclas sencillas de los años cuarenta. Además del líquido de suspensión y de las partículas, los fluidos contienen un dispersante y un activador. El dispersante impide que se junten en ausencia de campo eléctrico; estos fluidos son poco prácticos. El activador, casi siempre agua y en algunos casos alcohol, contiene sales disueltas u otras impurezas. El mecanismo por el que el activador produce su efecto no está del todo claro, pero en general se cree que el agua, repelida por un líquido de suspensión aceitoso, se sitúa en las superficies de las partículas. Las sales disueltas en el agua se polarizan entonces bajo la acción del campo eléctrico, añadiendo sus cargas a la polarización intrínseca de las partículas.

Estas formulas convencionales presentan dos problemas generales, además de la debilidad estructural. En primer lugar, dado que la intensidad del efecto electrorreológico aumenta con el tamaño de las partículas, se prefieren las partículas grandes, de tamaños muy por encima del nanómetro. Sin embargo, las partículas de gran tamaño tienden a hundirse hasta el fondo del fluido. (Por otra parte, los fluidos que contienen partículas de gran tamaño son más abrasivos que las suspensiones de partículas más pequeñas.) El segundo problema consiste en que un activador como el agua tiende a evaporarse o a experimentar reacciones químicas con los otros ingredientes del fluido; se reduce así la vida operativa, sobre todo a temperaturas elevadas.

La primera generación de fluidos electrorreológicos, desarrollada por Winslow, se mantenía húmeda por exposición al aire húmedo y contenía partículas de arenilla de sílice. Hará unos 10 años, James E. Stangroom y un grupo de investigadores, del Instituto de Tecnología Cranfield, desarrollaron una segunda generación de fluidos menos abrasivos, con partículas hechas con polímeros, pero que también contenían agua. El paso siguiente, que es el que está actualmente en curso, es el de la creación de fluidos sin agua que contengan partículas de tamaño muy pequeño y altamente polarizables.

Los dispositivos que podrían servirse de los fluidos electrorreológicos han venido cambiando desde los años cuarenta. La industria del automóvil sigue interesada en los materiales adaptables con tiempos de respuesta del orden de milisegundos, pero también les importan a otras que ni siquiera existían hace medio siglo. En la actualidad, buena parte del trabajo industrial está realizado por robots. Si la revolución de los semiconductores nos conduce a la revolución robótica tantas veces soñada, la disponibilidad de materiales adaptativos que puedan acoplar microprocesadores rápidos a sistemas de control mecánicos igualmente veloces será de la mayor importancia. Un robot tan ágil que llevase a cabo tareas que a nosotros nos serían más o menos rutinarias —por ejemplo, atrapar una pelota— necesitaría quizá de un sistema hidráulico basado en la rápidez de reacción de los fluidos electrorreológicos.

Imaginemos, por ejemplo, un dispositivo controlado por ordenador que hile el fino cable metálico con que se conectan los circuitos integrados. Para enrollarlo en un carrete tendría que controlar la tensión con gran precisión: el cable podría quedar flojo o romperse a menos que la máquina detectase el más ligero cambio en la tensión y reaccionara a él con rapidez. Se ha ensayado ya un prototipo de este dispositivo, con un embrague electrorreológico rápido. Quizá le sigan máquinas con “miembros” sobrehumanos que sujeten o suelten con la mayor precisión. No estarían, ni que decir tiene, a la altura del Terminator T-1000, pero serían duras de roer en el mercado tecnológico.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

INDUCED FIBRATION OF SUSPENSIONS. W. M. Winslow en *Journal of Applied Physics*, vol. 20, n.º 12, páginas 1137-1140; diciembre de 1949.

ELECTRORHEOLOGICAL FLUIDS AS COLLOIDAL SUSPENSIONS. Apice P. Gast y C. F. Zukoski en *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 30, n.ºs 3-4, páginas 153-202; diciembre de 1989.

ELECTRORHEOLOGICAL FLUIDS. T. C. Halsey en *Science*, vol. 258, páginas 761-766; 30 de octubre de 1992.

Plantas de polinización acuática

Consideradas, tiempo atrás, meras aberraciones de la naturaleza, estas fanerógamas corroboran el proceso de convergencia evolutiva hacia estrategias de polinización eficientes

Paul Alan Cox

Un soleado día de octubre de 1787, Filippo Cavolini remaba solo en la bahía de Nápoles. Perseguía un objetivo que parecía carecer de sentido. Cuatro años antes, unos buzos le habían regalado un ejemplar de *Zostera marina* en fruto. El botánico no tardó en darse cuenta de que la planta era especial: a diferencia de los sargazos y otras algas marinas que había recolectado, aquélla debía florecer. Pero, ¿qué flores podría echar? Terminó la búsqueda en el instante en que vio medrar una población de *Zostera* en la ensenada; se estremeció cuando descubrió "flotando en el agua una espiga (una inflorescencia), de las que caracterizan a las gramíneas".

Más tarde, al examinar el polen con el microscopio de su laboratorio, se asombró del tamaño y la forma de los granos, pues no eran pequeños ni esféricos como los de las plantas terrestres: "Me pareció [el polen de *Zostera*] diferente del que producen las demás plantas, alargado a modo de anguililla, que con un movimiento brusco y repentino derrama su esperma en un abrir y cerrar de ojos." De esta observación infirió una conclusión arriesgada y crucial: *Zostera* se reproduce por polinización en aguas abiertas.

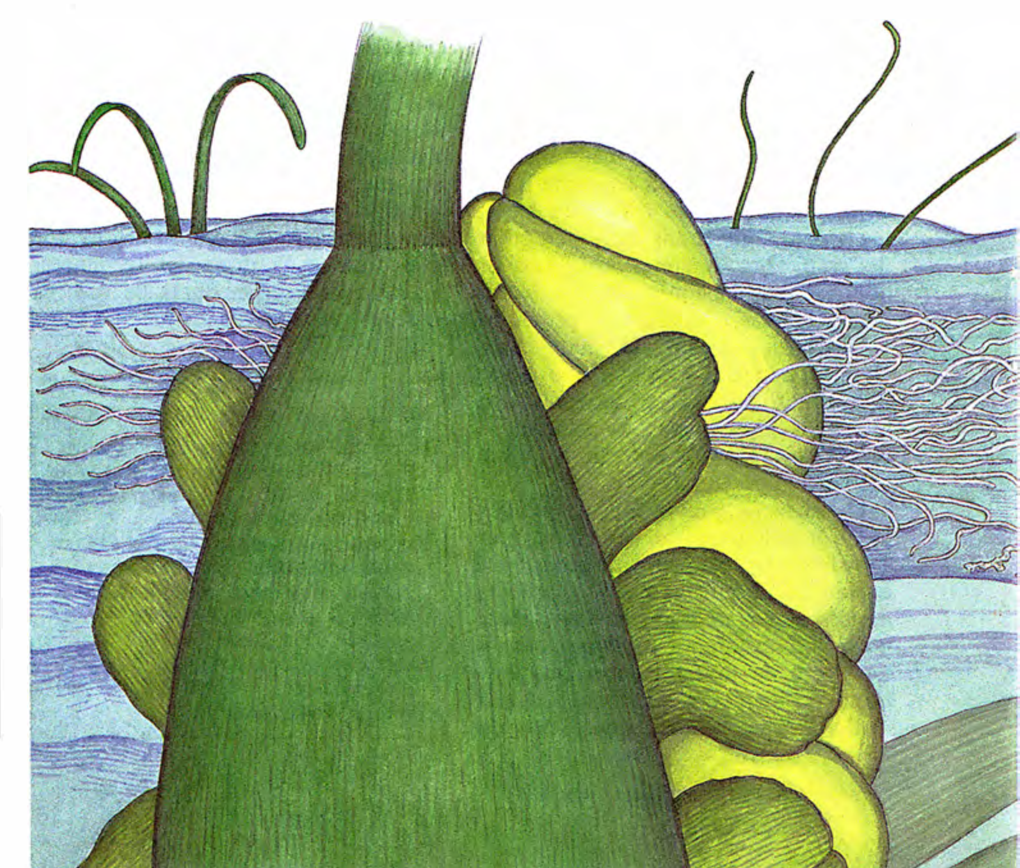
El de Cavolini no fue un hallazgo menor. Porque el agua disgrega los granos de polen de las plantas terrestres, los botánicos venían considerando el hábitat acuático un medio hostil contra la polinización. El polen, que transporta y protege la información genética de las plantas, es una adaptación necesaria para los antófitos terrestres, que se valen del viento y los animales para diseminar sus gametos.

La hidropolinización, el descubrimiento de Cavolini, ha merecido un nuevo análisis a la luz de la teoría de la búsqueda y la física de la difusión. De acuerdo con los resultados a que se llega, los sistemas de polinización hidrófila, aquellos que utilizan el agua como medio de transporte, no pueden reputarse meros caprichos de la historia natural. Frente a esa consideración tradicional, es más razonable entenderlos como ejemplos convicentes de convergencia evolutiva, ya que especies hidrófilas sin ninguna relación de mutuo parentesco han desarrollado estrategias similares para lograr una polinización eficiente. Pese a su adaptación exclusiva al medio, nada impide seguir la pista de sus antepasados hasta llegar a los antófitos que reinvadieron el hábitat acuático. Las plantas hidrófilas conservan así diversas características de los sistemas reproductores de sus homólogas terrestres, lo mismo que ballenas y marsopas retienen sus rasgos de mamífero tras el retorno de este grupo vertebrado al océano.

No hemos de confundir la polinización hidrófila con la reproducción de plantas carentes de flores (algas,

PAUL ALAN COX es decano y profesor de botánica en la Universidad de Brigham Young. Tras licenciarse por la Universidad de Wales y doctorarse por Harvard, ganó una bolsa de estudio para seguir investigando en la californiana de Berkeley y luego otra beca para continuar en la de Melbourne.

1. FLOR MASCULINA de *Phyllospadix scouleri* (*a la izquierda*); libera polen filamentoso que forma balsas con aspecto de copos de nieve. Las corrientes transportan las masas de polen hasta las flores femeninas (*a la derecha*), donde los granos polínicos alcanzan el estigma y se produce la fecundación.

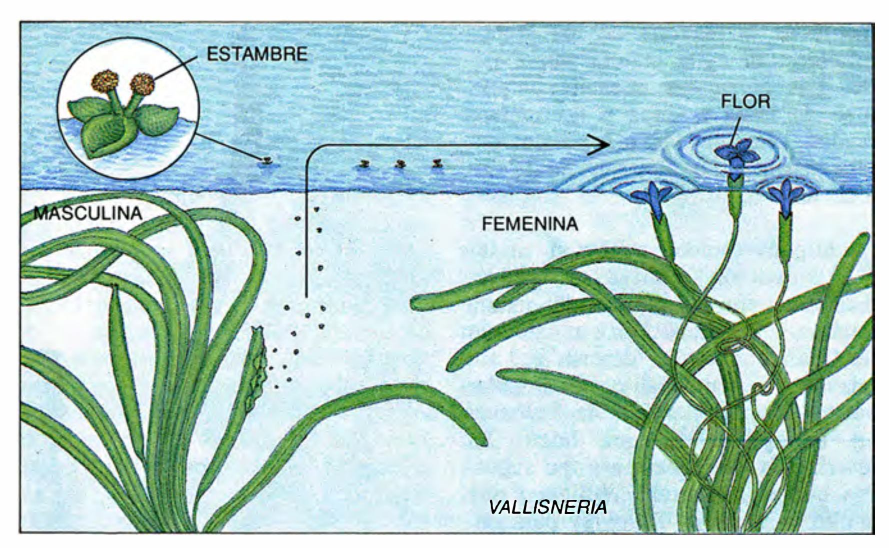


helechos, musgos y hepáticas). Aunque éstas precisan también el agua —sea el rocío o simple rociado— no producen polen; se limitan a dispersar sus gametos móviles en el agua. La polinización hidrófila tampoco se parece a la polinización aérea de otros antófitos acuáticos, que, como los lirios de agua, abren sus flores por encima de la superficie para recibir el polen que traen los insectos o el viento.

Las especies de polinización hidrófila no constituyen ninguna rareza taxonómica ni geográfica. Componen 31 géneros pertenecientes a 11 familias. Se distribuyen latitudinalmente desde Suecia septentrional hasta el sur de Argentina, y altitudinalmente desde 40 metros bajo el nivel del mar hasta 4800 metros de altura en los Andes, donde *Elodea potamogeton* entorpece la navegación del lago Titicaca, en la frontera entre Perú y Bolivia. Difieren, además, en su ecología, y así se extienden desde las pluviselvas tropicales hasta las charcas estacionales de los desiertos. Las especies de agua dulce sirven de alimento para peces y aves salvajes, en tanto que las especies marinas son el sustento de tortugas, manatíes y crustáceos.

¿Cómo consiguen las plantas hidrófilas utilizar con éxito el agua como vector de la polinización? A primera vista, el agua no es un medio idóneo para la dispersión del polen. Además de provocar la rotura frecuente de la mayoría de los granos polínicos, el agua resulta imprevisible. Las corrientes pueden comportarse de foma errática y las mareas pueden sumergir las plantas de manera repentina o alejarlas de la superficie.

Antiguos estudios recogían ya información relativa al aprovechamiento por las plantas del medio acuático. Erasmus Darwin, abuelo de Charles Darwin, describía, hace más de doscientos años, el singular sistema de polinización de *Vallisneria,* una planta de agua dulce. (La descripción de Darwin era tan sugestiva que el reverendo William Paley la citó en *Natural Theology* para demostrar la existencia de Dios.) Darwin descubrió que las plantas masculinas sumergidas liberan sus flores, que ascienden hacia la superficie. Una vez allí, los pétalos se recurvan y elevan la flor en un menisco de agua que le permite deslizarse con la brisa más ligera. Dos anteras estériles operan a modo de minúsculas velas, mientras que otras dos fértiles mantienen a flote el polen esférico de *Vallisneria.* A su vez, cada



2. POLINIZACION POR ENCIMA DE LA SUPERFICIE, una estrategia reproductora con la que cuentan las plantas hidrófilas (polinizadas en el agua). Los granos de polen sobresalen de la superficie y son transportados por las flores masculinas flotantes hasta que caen en las flores femeninas, fecundándolas. Emplean este método *Enhalus*, *Lagarosiphon* y *Vallisneria*.

flor femenina está anclada mediante un largo pedúnculo en el fondo del estanque y crea una ligera depresión en la superficie del agua. Cuando la flor masculina cae en el interior de la depresión formada por la flor femenina, aquélla transfiere el polen al estigma, posibilitando la polinización.

En 1792, Cavolini amplió sus primeros estudios sobre *Zostera*, demostrando la existencia de otro mecanismo para los antófitos acuáticos; consistía éste en la liberación directa del polen en el agua. Cavolini describió también una segunda especie de planta marina, *Cymodocea nodosa*, que libera directamente su polen, de aspecto filamentoso, sobre la superficie del agua; con sus propias palabras: "un polen blanco y capilar... cubría una gran zona de la superficie del agua". Este polen estaba protegido contra el desgarro ya que podía equilibrarse rápidamente con el agua de mar.

Las observaciones de Darwin y Cavolini sólo despertaron un interés pasajero entre algunos investigadores, que continuaron centrándose en la polinización mediada por animales y por el viento. Hasta hace unos veinte años los botánicos no empezaron a cuestionarse los aspectos evolutivos de la polinización hidrófila. ¿Existen unos principios generales aplicables a todos los sistemas de polinización hidrófila? ¿Qué rasgos permiten caracterizar los sistemas de polinización eficientes en un plano bidimensional, como el de la superficie del agua? ¿Qué morfología y dimensiones pueden presentar los granos de polen? ¿Se dispersa éste de manera aislada o en varios granos?

Se trata de cuestiones que caen de pleno en el campo de la teoría de la búsqueda, desarrollada durante la Segunda Guerra Mundial por el matemático Bernard O. Koopman y sus colegas del Grupo de Operaciones de Guerra Antisubmarina de la Marina estadounidense. En una sencilla y elegante exposición, Koopman demostró que, si una pieza de rastreo sigue una trayectoria al azar en dos dimensiones, la probabilidad de hacer blanco aumenta rápidamente con la amplitud de la trayectoria seguida. (Matemáticamente, la relación es $p = 1 - e^{-wL/A}$, donde p simboliza la probabilidad de alcanzar un objetivo, e designa la base de los logaritmos naturales, w representa la amplitud de la trayectoria recorrida por el instrumento de búsqueda, L señala la longitud de la trayectoria y A es el área de búsqueda.) La ecuación de Koopman tuvo una inmediata aplicación militar: el más modesto incremento en el campo del radar de un barco aumenta de manera espectacular la probabilidad de detectar un objetivo determinado durante una búsqueda aleatoria.

La ecuación de Koopman no sólo es aplicable a los barcos, sino también a los granos de polen en busca de estigmas. La ecuación permite un rendimiento mayor cuando los granos polínicos no siguen trayectorias completamente aleatorias. Si la probabilidad de encuentro con un objetivo es baja (supuesto más que razonable en la polinización acuática), un pequeño incremento en las dimensiones del instrumento de búsqueda aumentará de forma significativa la probabilidad de hacer diana en un estigma situado en la superficie del agua.

El significado evolutivo de la ecuación de Koopman resulta manifiesto en el caso de *Vallisneria*, la planta estudiada por Erasmus Darwin. En ella, las flores masculinas flotantes describen una trayectoria miles de veces más ancha que lo que puede hacerlo un simple grano de polen, incrementando así la eficacia de la búsqueda. Un sistema de poli-

3. POLEN EN LA SUPERFICIE DEL AGUA es el segundo método de estrategia reproductora. Algunas especies liberan polen filamentoso u oval, con el fin de formar balsas polínicas; otras envainan su polen esférico en tubos longilíneos. Los estigmas tienden a ser filamentosos en las especies marinas (*Amphibolis* y *Halodule*) y con aspecto de copa en las de agua dulce (*Ruppia* y *Lepilaena*).

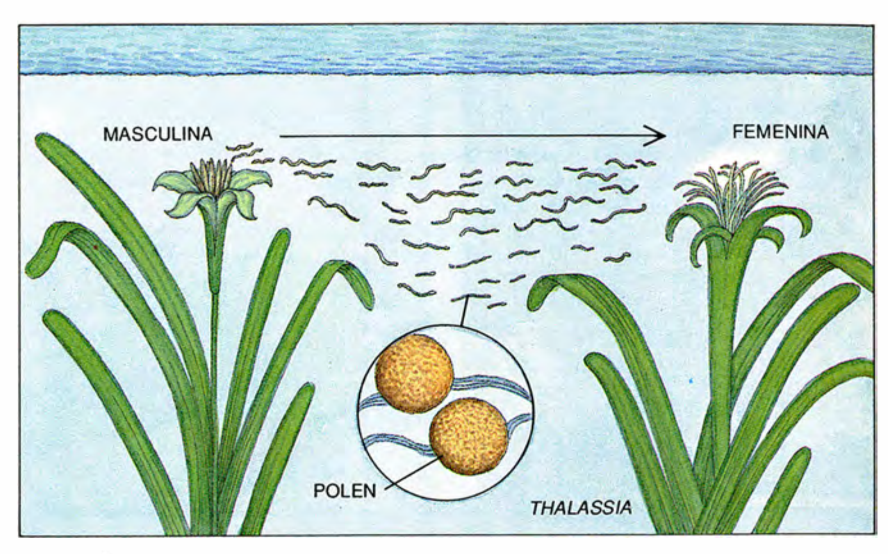
nización similar se da en *Lagarosiphon*, estudiado por C. D. K. Cook, de la Universidad de Zurich. Al igual que en *Vallisneria*, las flores masculinas son liberadas bajo el agua y ascienden hacia la superficie. Una vez allí, sus tres estambres estériles devienen erectos y cumplen la función de minúsculas velas. Los largos estambres fértiles, que se despliegan sobre la superficie del agua, llevan polen pegajoso en la extremidad de los rígidos filamentos. Las flores masculinas se mantienen unidas formando grandes plataformas que colisionan con las flores femeninas que flotan en el agua.

Pero, ¿qué sucede con las plantas como la estudiada por Cavolini, *Z. marina*, que liberan su polen directamente sobre la superficie del agua? ¿Es posible verificar también en este caso las predicciones acerca de la amplitud de la trayectoria de búsqueda? Para responder estas preguntas, R. Bruce Knox, de la Universidad de Melbourne, y el autor estudiaron la biología de la polinización de diversos géneros de plantas hidrófilas del Pacífico sur. Una de las plantas marinas investigadas fue *Halodule pinifolia*, especie que crece a lo largo de las costas arenosas de las islas Fiji. Durante el trabajo de campo acometido con P. B. Tomlinson, de la Universidad de Harvard, y John A. West, de la Universidad de California en Berkeley, el autor del artículo encontró poblaciones enteras de *Halodule* expuestas casi por completo durante la marea baja de primavera. Posteriormente, los blancos estambres de *Halodule* liberarían con parsimonia el largo y filamentoso polen flotante sobre la superficie del mar.

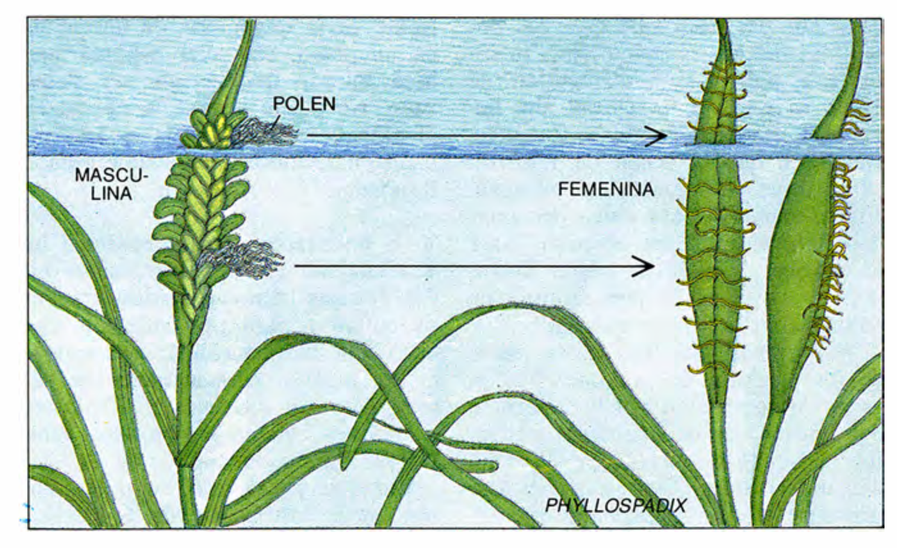
Los filamentos de polen poseen vainas de proteínas y carbohidratos que los hacen pegajosos. Se adhieren los unos a los otros y constituyen así balsas semejantes a copos de nieve. Millones de estos vehículos florales de búsqueda son arrastrados cuando la marea vuelve a subir hasta las charcas donde flotan los estigmas filamentosos de las flores femeninas. La colisión entre los instrumentos de búsqueda y los estigmas en la superficie del agua da como resultado la polinización.

Muchos otros géneros de plantas marinas juntan también sus instrumentos de búsqueda y amplían así la trayectoria de la misma, si bien la producción varía ligeramente. En la *Amphibolis* de Australia y *Thalassodendron* de Kenia, las flores masculinas flotan en la superficie, donde liberan polen filamentoso que se reúne constituyendo plataformas a modo de rejillas. Algunos géneros de plantas marinas, sin relación de parentesco, carecen de polen filamentoso y recurren a otras estrategias. En Fiji, los pequeños granos de polen ovalado de *Halophila ovalis* no originan plataformas, sino que están envainados en el interior de pegajosos tubos de mucílago que se ensamblan en balsas; parecen plumas flotantes. En Australia, la especie de agua dulce *Lepilaena cylindrocarpa* libera su polen esférico sobre esterillas mucilaginosas que tienen el aspecto de finas tortillas. Estas esterillas caen finalmente en depresiones provocadas por las flores femeninas.

Así pues, queda claro que muchas plantas hidrófilas —*Vallisneria*, *Halodule*, *Halophila* y *Lepilaena*, entre otras— representan en conjunto un ejemplo de evolución convergente: especies sin relación de parentesco han desarrollado medios similares (instrumentos de búsqueda flotantes) que sirven para aumentar el rendimiento de la polinización. Por supuesto, algunas especies hidrófilas poseen adaptaciones únicas, mecanismos que quizá son indicadores de caprichos evolutivos. ¿Qué estratega militar no dejaría de interesarse por

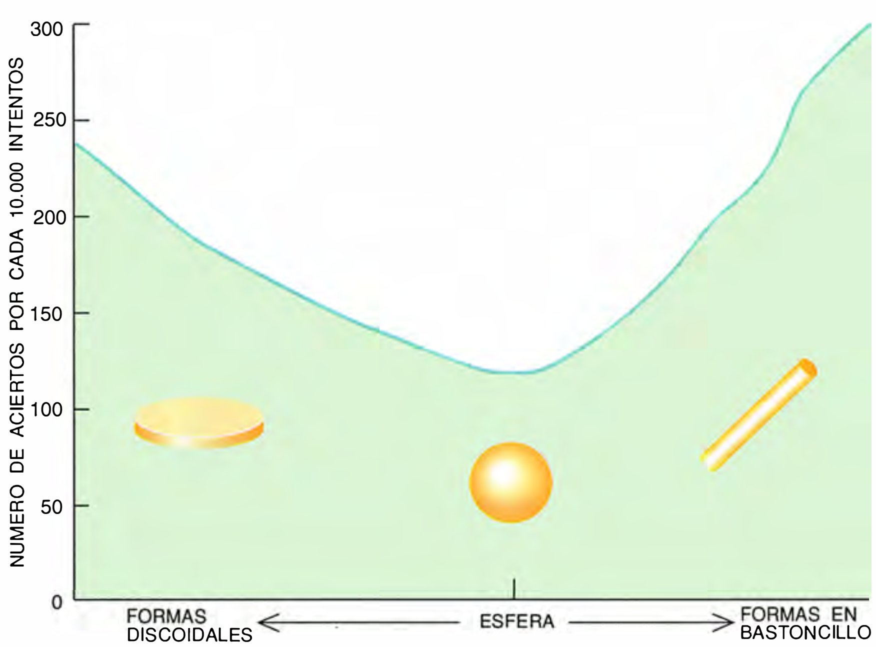


4. POLINIZACION SUBACUATICA, un tercer método de reproducción. En ciertas especies, filamentos o granos polínicos sujetos a hebras mucilaginosas son transportados bajo el agua por las corrientes. Otras liberan polen más denso que el agua. Los ejemplos incluyen los géneros *Thalassia*, *Syringodium* y una especie del género dulciacuícola *Lepilaena*.



5. TIPO MIXTO de transporte de polen. Utilizado por *Phyllospadix* y *Zostera*, combina la polinización de superficie con la submarina. El polen de superficie tiende a ser algo más filamentoso que el polen submarino. La liberación subacuática acontece en las zonas submareales, es decir, en aquellas poblaciones que nunca alcanzan la superficie, ni siquiera durante las mareas bajas.





6. MORFOLOGIA OPTIMA DEL POLEN para la fecundación subacuática. Se determinó mediante análisis en un superordenador. Se deformaron esferas en elipses de igual volumen, convirtiéndolas en largos bastoncillos o discos. Los bastoncillos demostraron ser más eficaces para alcanzar un objetivo; podemos asimilarlas a granos de polen submarinos como los de *Phyllospadix* (*fotografía*).

Zannichellia palustris? Cook y el autor, así como nuestros alumnos respectivos You Hao Guo y Rebeca Sperry, descubrieron que *Zannichellia* formaba amenazadoras nubes flotantes que descendían lentamente dejando caer los granos de polen sobre los estigmas. Afortunadamente, en este caso, el hecho de ser alcanzado por semejante carga de profundidad botánica no se traduce en destrucción de la flor, sino en reproducción de la planta. ¿Y qué golfista no se dejaría seducir por el sistema de polinización de otra planta de agua dulce, *Hydrilla verticillata*, también estudiada por Cook? En ésta, las flores masculinas ascienden hacia la superficie del agua y catapultan de golpe su polen a través del aire hacia las flores femeninas flotantes. Debido a que el polen de *Hydrilla* se destruye en contacto con el agua, sólo disponen de esa única oportunidad para alcanzar su objetivo. Ante la enorme cantidad de polen liberado, es muy alta la probabilidad de fecundación de algún estigma.

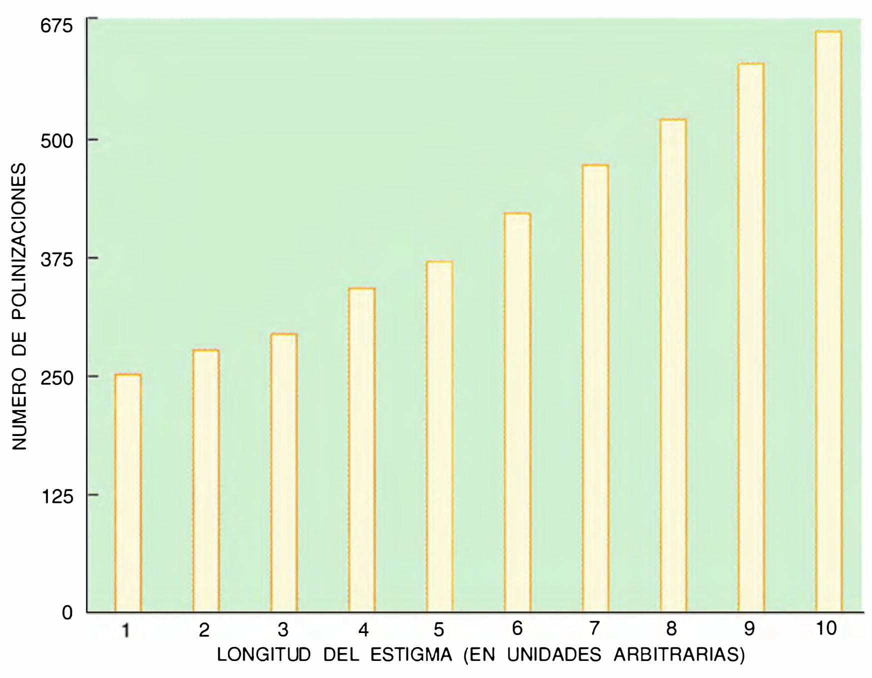
Nos hemos ocupado hasta ahora de los sistemas de polinización con granos transportados por la superficie del agua, o por encima de la misma. En tales casos, el polen avanza en dos dimensiones. Otras especies tienen sistemas de polinización que actúan en tres dimensiones —es decir, bajo la superficie [*véase* "Polinización submarina", de John Pettitt, Sophie Ducker y Bruce Knox; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 1981].

Las estrategias de polinización en tres dimensiones parecen ser menos comunes que los tipos en dos dimensiones, por la probable razón de su menor eficiencia intrínseca. En tres dimensiones, el polen y los estigmas se encuentran dispersos en un volumen, y no concentrados en un plano (como es el caso de la superficie del agua), y, por tanto, es necesaria mayor cantidad de polen. Las consecuencias del movimiento estocástico también difieren bastante en tres dimensiones. Una búsqueda aleatoria es mucho más eficiente en dos dimensiones debido al carácter recurrente de la trayectoria de búsqueda: en un plano, cualquier estigma acabará antes o después por ser alcanzado. No puede decirse lo mismo en el caso de una búsqueda en tres dimensiones, aun concediéndole tiempo ilimitado.

La polinización tridimensional ha cuajado en aquellas plantas hidrófilas que hubieran sufrido grandes dificultades para persistir con una estrategia bidimensional; me refiero a las plantas permanentemente sumergidas. Un ejemplo es *Thalassia testudinum*, planta caribe que Tomlinson, Thomas Elmqvist, de la Universidad de Umeå, y el autor estudiaron en la isla caribe de St. Croix. *Thalassia* libera su polen redondeado bajo el agua, incrustado en largas hebras de mucílago. Tras ser arrastradas bajo el agua por la corriente, las hebras colisionan con los estigmas, duros e hirsutos, de las plantas femeninas. Un mecanismo de polinización subacuática similar de polen, redondeado e incrustado en largas hebras mucilaginosas, caracteriza también a *Lepilaena bilocularis*, especie de agua dulce, sin parentesco con la anterior y hallada en el lago Ellesmere, en la isla neozelandesa del Sur.

Deseábamos comprobar si esta semejanza del tipo "collar de perlas" entre especies tan alejadas en su taxonomía y distribución geográfica representaba una estrategia de polinización tridimensional eficaz. Junto con los entonces alumnos míos Tyler Jarvis, hoy en la Universidad de Princeton, y Scott Cromar, en la de Rutgers, realicé una serie de experimentos numéricos en un superordenador en el centro de computación científica que la empresa IBM tiene instalado en Palo Alto. Deformamos esferas en diversos grados de esfericidad, manteniendo siempre constante su volumen. Obtuvimos una gran variedad de formas, desde largos filamentos hasta discos aplanados. Determinamos luego la frecuencia con que cada una de las formas hacía blanco en objetivos dispuestos al azar. De las simulaciones se deducía que, en lo concerniente a la búsqueda tridimensional, todas las deformaciones elípticas resultaban mucho más eficaces que las esferas.

En fecha más reciente, con mi alumno David Smith, actualmente en Princeton, y David A. Olson, enton-





7. MORFOLOGIA OPTIMA DEL ESTIGMA en la polinización de superficie. Se determinó deformando esferas en elipses cada vez más largas. Los granos de polen colisionaban con los largos estigmas elípticos, en una frecuencia mucho mayor que con los estigmas redondeados. Los resultados son comparables con los estigmas de *Zostera marina*. (Se aprecian los filamentos de polen adheridos.)

ces en el Instituto Courant de Ciencias Exactas, adscrito a la Universidad de Nueva York, logré la confirmación analítica de los experimentos numéricos. Las ecuaciones han revelado algo que los experimentos del superordenador habían pasado por alto: las figuras que son sólo ligeramente disciformes resultan las menos eficientes en la búsqueda tridimensional. Aun así, la conclusión general se mantiene. Los vectores de búsqueda utilizados por *T. testudinum*, del Caribe, y *L. bilocularis*, de Nueva Zelanda, consisten en polen adherido a una hebra mucilaginosa y representan una solución altamente rentable del problema de la localización de objetos distribuidos en tres dimensiones.

Algunas especies hidrófilas combinan los dos tipos de estrategias, las bidimensionales y las tridimensionales. *Enhalus acoroides*, fanerógama marina que el autor estudió en la isla indonesia de Banda, florece únicamente durante las mareas bajas de primavera. Al igual que en el caso de *Vallisneria*, los botones de las flores masculinas ascienden hacia la superficie, se abren y son capturados entre los arrugados pétalos de las flores femeninas. Cuando la marea sube, los pétalos de éstas se cierran, quedando las flores masculinas atrapadas en su interior. Sin embargo, *Enhalus* dispersa cierta cantidad de polen directamente sobre la superficie del agua.

La especie *Phyllospadix scouleri* dispersa también polen filamentoso en superficie y bajo ésta. Estudiando una población a lo largo de la costa septentrional de California, Tomlinson, Kevin Nieznanski y el autor observaron vectores de búsqueda polínicos flotantes de *Phyllospadix* colisionando con estigmas femeninos. Pero las micrografías electrónicas de estigmas recolectados muy por debajo de la superficie del agua también presentaban polen, señal de que la polinización submarina también podía tener lugar.

Otro ejemplo de polinización combinada, de superficie y submarina, nos lo ofrece la planta estudiada por Cavolini: *Z. marina*. A. W. A. M. de Cook, de la Universidad Católica de Holanda, descubrió que, si bien el polen de *Zostera* liberado bajo el agua en los acuarios se hundía lentamente, el polen dispersado por las poblaciones intermareales durante la marea baja flota en superficie. Roger H. Laushman, del Colegio Oberlin, Mary H. Ruckelshaus, de la Universidad de Washington, y el autor del artículo confirmaron las conclusiones de Cook mientras trabajaban en los Laboratorios Friday Harbor Marine, en las islas San Juan del estado de Washington. Descubrieron que las balsas de polen, parecidas a copos de nieve, flotaban en la superficie; aunque también observaron haces de polen filamentoso dispersos por debajo de la superficie del mar.

Los métodos de búsqueda eficientes no constituyen la única manera de reforzar la probabilidad de polinización. La evolución puede primar la selección de estigmas que se dejen alcanzar fácilmente. Mas, para nuestra desgracia, los estrategas militares que desarrollaron la teoría de la búsqueda no consideran tarea prioritaria el diseño de objetivos de cómodo abatimiento. Ha recaído, pues, en los botánicos la mayor parte del análisis del diseño de objetivos.

Desde el punto de vista de los estigmas, éstos disponen, como mínimo, de dos maneras de aumentar las posibilidades de ser alcanzados por un grano polínico o por una balsa de polen. En primer lugar, la ampliación del área eficaz del objetivo; en segundo lugar, la alteración de la morfología del estigma a fin de incrementar la probabilidad de encuentro.

Las estructuras florales de muchas plantas con polinización acuática adoptan la primera solución. Flores como las de *Vallisneria* y *Enhalus* provocan depresiones en la superficie del agua, determinando así un área del objetivo mucho mayor que un simple estigma o incluso que una flor femenina completa. *Lepilaena cylindrocarpa*, de Australia, proporciona otro ejemplo. Usher Posluszny, de la Universidad de Guelph, nos llamó la atención sobre una pequeña bráctea que mantiene unidos los tres estigmas de la flor femenina, libres entre sí, antes de la fecundación. Se-





8. SOLO CUANDO SE ABREN PASO a través de la superficie durante las mareas bajas de primavera pueden diversas plantas hidrófilas marinas liberar allí el polen o las flores. Se comporta así una población de *Phyllospadix* de la costa californiana de Monterey (*izquierda*). El polen de muchas de las especies hidrófilas se reúne formando balsas, como el de *Amphibolis* (*derecha*).

mejantes a un guante de béisbol, los tres unidos provocan una depresión en la superficie del agua.

El movimiento oscilatorio de algunas partes de la planta puede ensanchar también el área efectiva del objetivo. En una corriente suave, el largo pedúnculo de *Ruppia marina* funciona de manera muy parecida a un limpiaparabrisas: hace que las flores se balanceen suavemente hacia delante y hacia atrás recolectando las balsas de polen parecidas a copos de nieve. Las estructuras florales podrían tener también efectos locales. Joseph D. Ackerman, entonces en la Universidad de Cornell, observó que las inflorescencias sumergidas de *Zostera* influían en las corrientes submarinas. Descubrió que, en condiciones de laboratorio, las corrientes alteradas pueden concentrar el polen cerca de los estigmas.

Las investigaciones sobre la segunda posibilidad de incrementar la eficacia del objetivo —variando la morfología del mismo— no se iniciaron hasta hace cinco años. En una serie de simulaciones por superordenador, James A. Sethian, de Berkeley, y el autor descubrieron que, en dos dimensiones, los estigmas filamentosos tienen muchas más posibilidades de ser alcanzados que los estigmas circulares. Los estigmas filamentosos, larguísimos, de los géneros de fanerógamas marinas *Halodule*, *Halophila* y *Thalassodendron* parecen confirmar esta predicción.

Las observaciones de campo también contradicen hipótesis anteriores, según las cuales las plantas hidrófilas raramente florecían o eran polinizadas. El autor descubrió que la floración y la polinización cruzada (la transferencia de polen de un individuo a otro) son fenómenos comunes, aunque efímeros algunas veces. La frecuencia de floración —y en consecuencia de la fecundación cruzada— puede afectar directamente la diversidad genética de las poblaciones. Mediante la técnica de electroforesis en gel de almidón, Laushman halló que la polinización cruzada menudeaba en las poblaciones de *Zostera*, en particular en las zonas intermareales donde se produce polinización de superficie.

Otros investigadores, sin embargo, no apreciaron tanta diversidad. Basándose en sus estudios sobre la especie de agua dulce *Ceratophyllum demersum*, Donald H. Les, de la Universidad de Wisconsin en Milwaukee, cree que las plantas hidrófilas podrían presentar cierta uniformidad genética. Tal uniformidad puede ser debida a la autopolinización. A este propósito, C. Thomas Philbrick, del Jardín Botánico Rancho Santa Ana en la californiana Claremont, descubrió que, en una especie sumergida de *Potamogeton*, el polen podía ser transportado desde la antera hasta el estigma de la misma flor por medio de burbujas de aire. La homogeneidad genética puede obedecer también a una floración infrecuente y a las grandes dimensiones de los clones en una población.

Aunque el mecanismo de la polinización acuática no ha logrado descifrar la genética de las poblaciones hidrófilas, ofrece indicios para explicar por qué estas plantas siguieron modelos evolutivos distintos de los adoptados por sus análogas terrestres. La morfología filamentosa del polen es una característica distintiva de las plantas hidrófilas. Para estudiar la aparición de este tipo de polen, C. J. Humphries, del Museo de Historia Natural de Londres, y el autor se propusieron reconstruir el árbol genealógico de la familia de plantas marinas Cymodoceaceae. Descubrieron que dicha familia, que abarca los géneros *Thalassodendron*, *Amphibolis*, *Syringodium*, *Halodule* y *Cymodocea*, comparte un antepasado con *Posidonia* (planta marina encontrada en el Mediterráneo y el oeste de Australia) y las Zosteraceae, familia de los géneros *Zostera*, *Phyllospadix* y *Heterozostera*. El análisis sugirió que el antepasado común poseía polen de aspecto filamentoso. Por tanto, éste se originó probablemente una sola vez, lo que explicaría por qué otros géneros de plantas marinas, sin vínculo de parentesco, como *Halophila*, *Thalassia* y *Enhalus*, continúan teniendo polen esférico similar al de las plantas terrestres.

Otra característica notable de las plantas hidrófilas consiste en el dioicismo: la separación de las flores

masculinas y femeninas en pies diferentes. Más de la mitad de las especies hidrófilas son dioicas. En contraposición, únicamente alrededor del 3 o el 4 por ciento de las especies terrestres lo son. Las plantas hidrófilas pueden haber evolucionado hacia el dioicismo debido a la incompatibilidad física entre los mecanismos de dispersión del polen a través del agua y los de captura del mismo en una sola flor. Una morfología floral combinada podría tener como resultado que una flor capturara su propio polen antes de su dispersión, frustrando así la posibilidad de la polinización cruzada de las plantas.

La alta proporción de dioicismo observado podría también tener que ver con la autorreproducción, pues así se evita. Debido a que muchas poblaciones hidrófilas constan de grandes clones, la autorreproducción puede instarse si partes masculinas y femeninas coinciden en la misma planta. Los mecanismos alternativos que favorecen la reproducción cruzada, típicos de las plantas terrestres, no funcionan quizá con idéntica eficacia en las plantas hidrófilas. Por ejemplo, la maduración de las flores masculinas y femeninas en diferentes períodos de tiempo —un fenómeno típico en las plantas terrestres— es probablemente difícil de sincronizar en un clon importante de plantas marinas.

Las notas insólitas de las plantas hidrófilas, amén de atraer nuestra fascinación, las hacen extremadamente útiles como organismos donde abordar problemas de ecología evolutiva y demografía vegetal. La esperanza de vida del polen hidrófilo es fácil de determinar por la sencilla razón de que los granos polínicos de muchas plantas hidrófilas presentan corrientes citoplasmáticas. Esta característica, que el microspio nos revela, corresponde al movimiento del citoplasma en el interior del grano de polen. El autor descubrió que el polen de *Zostera* tiene un tiempo de vida brevísimo: casi la totalidad del polen muere a las ocho horas de su eclosión. Más difícil resulta, en cambio, determinar la esperanza de vida del polen terrestre, al que hemos de teñir, por lo común, para determinar su viabilidad.

Además, no cuesta demasiado establecer el destino de cada grano de las especies polinizadas en superficie. Podemos examinar, fotograma a fotograma, cintas de vídeo de la superficie del agua y trazar así la trayectoria de los granos, estrategia a todas luces inviable en las plantas cuyo polen lo acarrean el viento o los animales.

Las especies hidrófilas podrían arrojar luz sobre las pautas de colonización geográfica y la genética de poblaciones vegetales, ya que las poblaciones de agua dulce de plantas hidrófilas están, esencialmente y en lo que a la reproducción concierne, aisladas. El polen transportado por el agua no puede saltar de un estanque a otro. El flujo génico entre poblaciones ha de fundarse en la transferencia de frutos o en el desgarro de fragmentos vegetativos que se diseminan. El vigoroso crecimiento clónico de la mayoría de las plantas polinizadas por el agua también las hace ideales para experimentos de ecología: podemos exponer el mismo genotipo a distintos ambientes.

Comparado con el interés generalizado por la polinización anemócora y animal, se ha trabajado poco sobre polinización hidrófila desde que Cavolini descubriera las flores de *Zostera* en la bahía de Nápoles. Aun cuando las plantas polinizadas en el agua no producen flores grandes y conspicuas, a diferencia de muchas terrestres, para el autor son exquisitamente hermosas. Las plantas proporcionan oportunidades tanto al botánico aficionado como al profesional para hacer observaciones originales de historia natural y estudiar con mayor rigor la convergencia evolutiva del medio acuático.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SEARCH AND SCREENING. B. O. Koopman. Pergamon Press, 1980

HYDROPHILOUS POLLINATION. P. A. Cox en *Annual Review of Ecology and Systematics*, vol. 19, páginas 261-280; 1988.

TWO-DIMENSIONAL POLLINATION IN HYDROPHILOUS PLANTS: CONVERGENT EVOLUTION IN THE GENERA *HALODULE* (CYMODOCEACEAE), *HALOPHILA* (HYDROCHARITACEAE), *RUPPIA* (RUPPIACEAE), AND *LEPILAENA* (ZANNICHELLIACEAE). P. A. Cox y R. B. Knox en *American Journal of Botany*, vol. 76, n.º 2, páginas 164-175; febrero de 1989.

SURFACE AND SUBMARINE POLLINATION IN THE SEAGRASS *ZOSTERA MARINA L.* Paul A. Cox, Roger Laushman y Mary H. Ruckelshaus en *Botanical Journal of the Linnaen Society*, vol. 109, n.º 2, págs. 281-291; junio de 1991.

UNDERWATER POLLINATION, THREE-DIMENSIONAL SEARCH, AND POLLEN MORPHOLOGY: PREDICTIONS FROM A SUPERCOMPUTER ANALYSIS. P. A. Cox, S. Cromar y T. Jarvis en *Pollen and Spores: Patterns of Diversification*. Dirigido por S. Blackmore y S. H. Barnes. Oxford University Press, 1992.

Simulación de lesiones cerebrales

Los adultos que sufren ciertas lesiones cerebrales cometen extraños errores de lectura. De un modo muy parecido se comporta una red de neuronas simuladas, enseñada a leer y dañada luego deliberadamente

Geoffrey E. Hinton, David C. Plaut y Tim Shallice

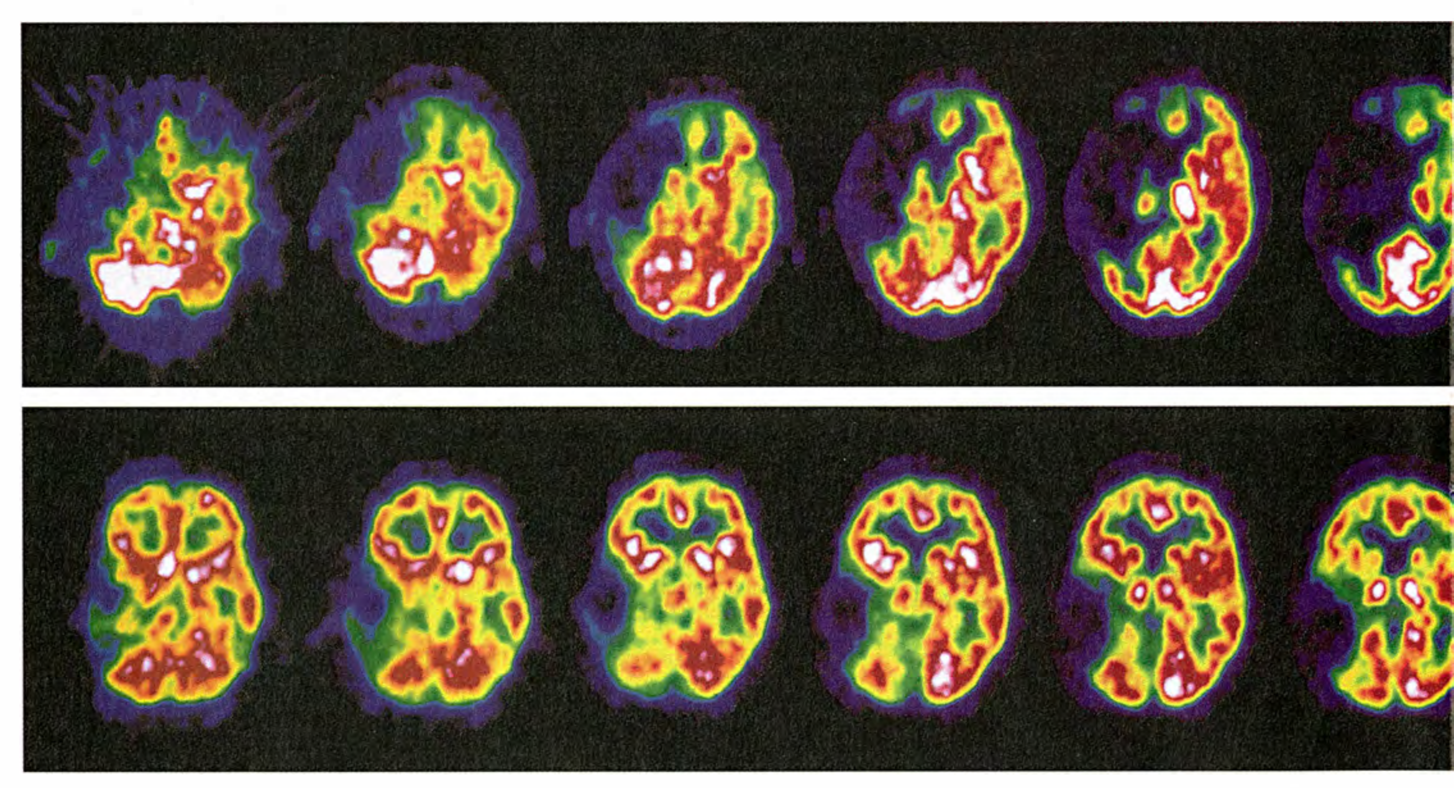
En 1944 un joven soldado, al que llamaremos G. R., recibió un balazo en el cerebro, y aunque salvó la vida quedó marcado por una extraña secuela. Podía leer y comprender ciertas palabras con soltura, pero erraba en muchas otras. Así, al leer confundía adjetivos (*antiguo*) con los sustantivos a los que a veces califican ("jarrón"), e invertía parentescos como "sobrino" por *tío*.

Esta anormalidad, tan penosa para G. R., fue no obstante de inmenso valor para estudiar los mecanismos cerebrales de la comprensión del lenguaje escrito. Un sistema que convierte correctamente las letras de un texto en sonidos del habla revela muy poco de su estructura interna; por el contrario, cuando ese sistema se altera, la forma peculiar de la disfunción resultante nos puede dar pistas esenciales para conocer la arquitectura que tenía antes de sufrir daño alguno.

En los años más recientes, los progresos logrados en la simulación por computador de las funciones cerebrales han permitido modelar las vías de procesamiento de la información. Hemos descubierto así que, deteriorando intencionadamente los sistemas artificiales, pueden mimetizarse los síntomas que presentan las personas aquejadas de lesiones cerebrales persistentes. Como es natural, la construcción de un modelo que comete los mismos errores de tales pacientes nos hace confiar en que seguimos el buen camino para entender cómo opera el cerebro.

Nuestros modelos de simulación ni siquiera alcanzan a imitar una pequeñísima parte de la capacidad del cerebro humano. A pesar de ello, los resultados hasta ahora obtenidos ofrecen perspectivas inéditas del proceso que sigue éste para transformar una sucesión de dibujos de letras en el significado de una palabra.

Volviendo a G. R., cuando le examinaron en 1966 John C. Marshall y Freda Newcombe, de la Universidad de Oxford, manifestó defectos de lectura de un marcado corte idiosincrásico. Además de sus abundantes fallos semánticos, G. R. caía en otros de índole visual, que en español equivaldrían



1. IMAGENES DEL CEREBRO obtenidas por el grupo de Cathy J. Price, de la Unidad Ciclotrónica de MRC en Londres. Estas tomografías muestran las lesiones en las áreas de procesamiento del lenguaje de dos pacientes con dislexia adquirida —hoy de posible simulación por redes neuronales artificiales—, y presentan la actividad cerebral en cortes horizontales sucesivos,

a leer "sobo" donde está escrito *sorbo* y "queso" donde dice *hueso*. De estas falsas lecturas, muchas se parecían a la palabra correcta tanto en el significado como en la forma: por ejemplo, leía "altura" donde ponía *alto*.

Mediante exhaustivas pruebas se demostró que G. R. leía mucho mejor las palabras con significado concreto (*mesa*, *cama*), que las abstractas como *verdad* o *belleza*, y que la calidad de su lectura iba menguando desde los sustantivos (46 %) a los adjetivos (16 %) y los verbos (6 %), hasta un mínimo del 2 % en los términos de función. Por último, le era totalmente imposible leer sartas de letras con apariencia de palabra pero carentes de significado, como *matejo* o *rutia*.

Desde entonces, los especialistas clínicos han examinado a más de 50 pacientes que cometen errores semánticos al leer en voz alta, presentando casi todos ellos la misma extraña combinación de síntomas. En 1973, Marshall y Newcombe describieron dos tipos muy distintos de dislexia. En el llamado "superficial", los pacientes leen mal las palabras que se pronuncian de un modo desacostumbrado, y suelen dar de ellas la pronunciación más corriente; así leerían "cálido" donde hay escrito *caldo*. En cambio, un disléxico "profundo" como G. R. puede que ahí leyera "calor".

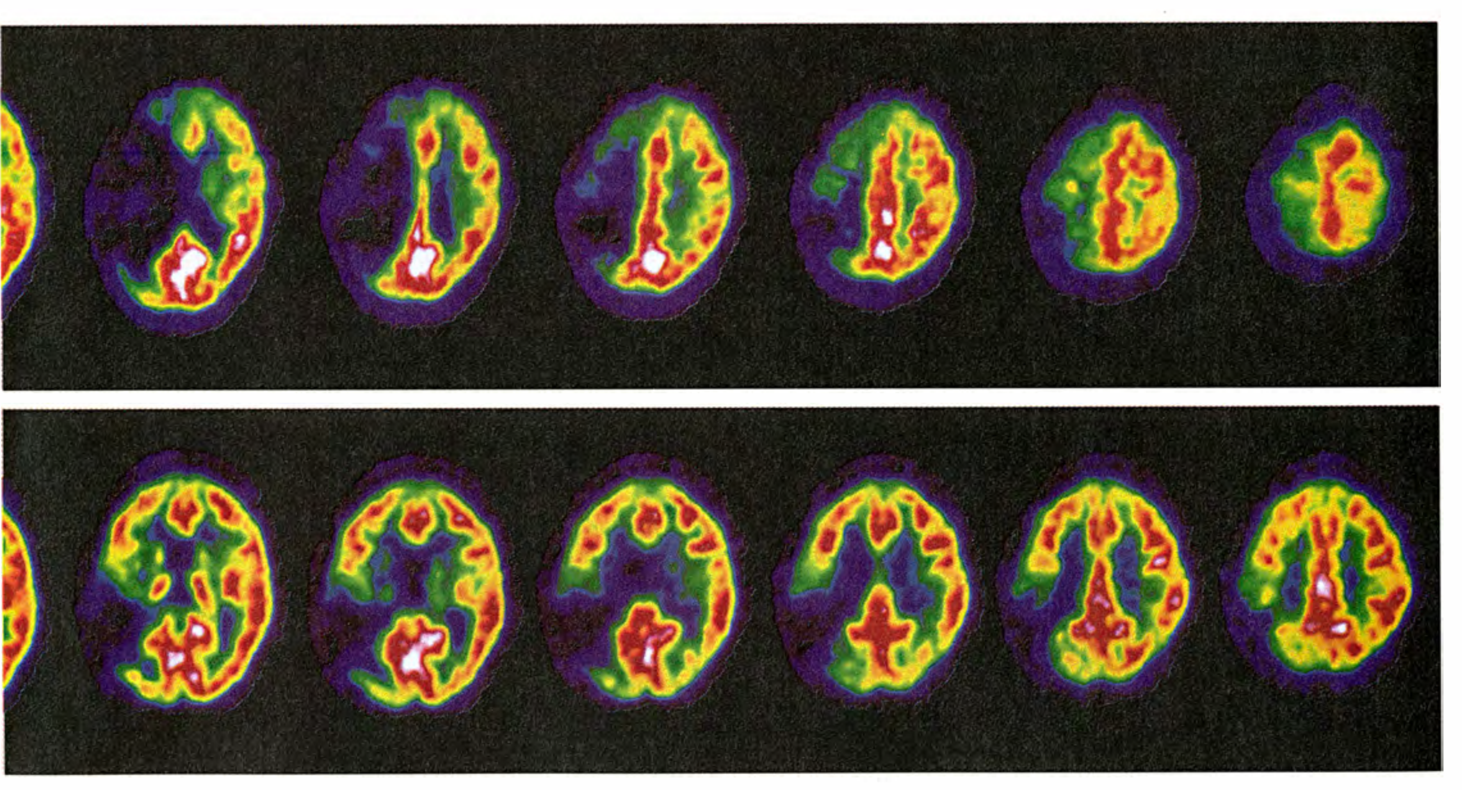
Según esos autores, el que existan dos modalidades de dislexia se debe a que la información procesada en la lectura normal recorre dos rutas distintas y complementarias entre sí. La dislexia superficial reside en la ruta fonológica, basada en la correspondencia normal entre letras y sonidos. La dislexia profunda, en cambio, proviene de la ruta semántica, es decir, la que deriva los significados directamente de la forma visual de las palabras (siempre que ello sea posible). Para quien lea en voz alta a través de la ruta semántica, la pronunciación obedece exclusivamente al significado.

En opinión de Marshall y Newcombe, los errores de un disléxico profundo reflejan el aislamiento en que trabaja la ruta semántica. Los últimos resultados empíricos apuntan a que tal explicación se ha simplificado en exceso, pero el concepto de ruta semántica sigue aceptándose. Parece ahora verosímil que esos disléxicos no sólo han perdido su ruta fonológica, sino que además sufren lesión en alguna parte de su ruta semántica.

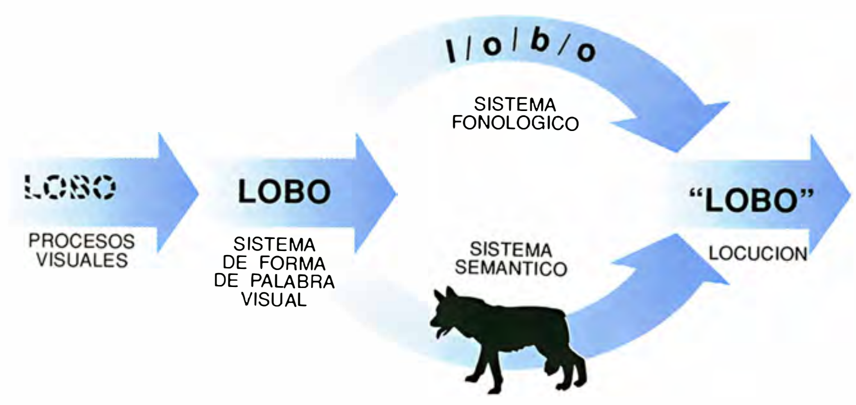
El supuesto de que el proceso de lectura depende de rutas diversas, vulnerables por separado, ha rendido buenos frutos para la clasificación de los pacientes, pero no ha sido tan útil para conocer la exacta naturaleza del trastorno. Max Coltheart, de la Universidad de Macquarie, y Eleanor M. Saffran, de Temple, afirman que el modo de leer de los disléxicos profundos recuerda mucho el de los pacientes que sólo tienen el hemisferio derecho del cerebro en actividad.

GEOFFREY HINTON, DAVID C. PLAUT y TIM SHALLICE investigan el comportamiento del cerebro mediante redes neuronales artificiales. Hinton enseña informática y psicología en la Universidad de Toronto. Plaut se halla adscrito al departamento de psicología de la Carnegie Mellon. Shallice, docente en el Colegio Universitario de Londres, estudia el sistema cognitivo normal a través de los deterioros que resultan de afecciones neurológicas.

La anterior explicación, sin embargo, arroja muy poca luz sobre la especialísima configuración que adoptan los errores en la dislexia adquirida. Cualquier análisis detallado del modo de originarse estos errores y la razón de que formen patrones coherentes requiere disponer de un modelo que represente el procesamiento de información en cada ruta, así como la aparición de errores en el proceso cuando se dañan las conexiones neuronales. Muchas veces, los psicólogos recurren a algoritmos abstractos para describir el tratamiento de la información en el cerebro, pero es obvio que tales razonamientos no pueden tener en cuenta todas



empezando por arriba (*niveles bajos de actividad en azul, y altos en blanco*). El paciente de la fila superior ha perdido casi toda la funcionalidad en el hemisferio izquierdo de la corteza cerebral, salvo en las regiones posteriores. El otro tiene dañados los lóbulos parietal y temporal del hemisferio izquierdo, regiones que se estiman esenciales para el tratamiento del lenguaje.



2. HAY EN EL CEREBRO DOS VIAS responsables del procesamiento mental y la pronunciación de las palabras escritas. Una (la ruta fonológica) deriva la pronunciación de los dibujos de las letras, y la otra (la ruta semántica), del significado.

las lesiones a que están expuestas las células cerebrales.

En vista de ello, hemos centrado nuestra labor en las redes neuronales, que no son sino simulaciones informáticas ideales de conjuntos de neuronas. Así, en unas redes desarrolladas para desempeñar la función de la ruta semántica, suprimimos luego de un modo selectivo conexiones interneuronales para ver cómo variaba su comportamiento. En una red sencilla que hace muy pocos años diseñamos para remedar la ruta semántica, observamos que, alterando una parte cualquiera de ella, podían reproducirse varios síntomas de la dislexia profunda. De entonces acá hemos construido modelos más finos para averiguar a qué características de las arquitecturas neuronales era imputable tal proceder. Además, hemos buscado explicar por este método otros síntomas adicionales de la dislexia profunda.

Nuestros modelos de la ruta semántica se componen de unidades interconectadas que hacen el papel de neuronas. Cada unidad neuronal posee un nivel de actividad, calibrado entre 0 y 1, que depende de las señales de entrada (ingresos) aferentes de las otras neuronas. A las conexiones entre unidades se les atribuye un coeficiente de ponderación (o "peso") modificable, el cual cuantifica la influencia de la señal de salida (egreso) de una unidad en la actividad de la unidad a la que alimenta. La estructura de las conexiones entre neuronas, junto con el peso asignado a cada una de ellas, determina la computación que lleva a cabo la red.

La primera versión de nuestra red comprendía tres conjuntos de unidades: "grafemas", uno por cada letra que pudiera ocupar una posición dada en la palabra; "sememas", que representaban significados de palabras; y un nivel de unidades intermedias que posibilitaban el aprendizaje de asociaciones complejas. Una red enteramente general exigiría 26 grafemas para cada posición de la palabra, pero el uso de un vocabulario simplificado nos permitió reducir ese número: por ejemplo, en la primera posición siempre había un grafema de consonante y en la segunda, de vocal.

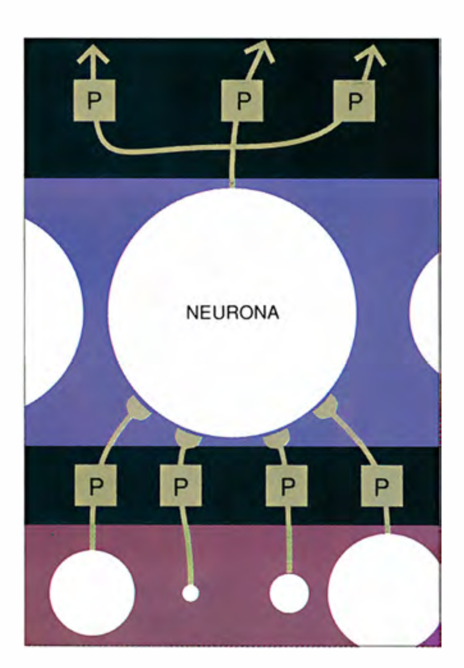
Los sememas no se corresponden directamente con significados de palabras individuales, sino con particularidades semánticas que describen la entidad real. La palabra *gato* activa unidades tales como "mamífero", "con patas", "de tacto suave" y "fiero". Otras unidades, que representan características semánticas no atribuibles a esa entidad ("transparente", "de fuerte sabor", "parte de un miembro", "de trapo", etcétera), permanecerán en reposo. En nuestra red se incorporan 68 sememas, que indican atributos físicos y funcionales de una definición del término. Cada palabra elegida por nosotros estaba representada por una diferente combinación de sememas activos y en reposo.

Para conseguir que esta red reprodujera la configuración correcta de características semánticas en cada palabra, tuvimos que dar a cada conexión el valor de peso apropiado. Ponderación que no se realiza manualmente, sino a través de un proceso de aprendizaje: un algoritmo de programación de redes neuronales. En efecto, para entrenar en cierta tarea a una red, se comienza fijando unos pesos aleatorios y luego se presenta repetidamente a ésta un "juego de entrenamiento" de patrones de ingreso (en este caso, letras en posiciones determinadas). A cada nueva pasada de entrenamiento, el algoritmo ajusta los pesos para reducir la diferencia entre la salida (egreso) de la red y la respuesta "correcta".

Desde los años cincuenta, sabemos cómo ajustar los pesos en redes neuronales sencillas, de dos niveles o estratos, pero el entrenamiento de redes con mayor número de estratos es harto más difícil. En particular, no se ve de inmediato un procedimiento para ajustar los pesos en las conexiones que van de las unidades de ingreso a las unidades intermedias (ocultas), dado que no es posible establecer a priori cuáles de estas últimas unidades han de activarse para una entrada y una salida dadas.

Ya en los ochenta, sin embargo, los investigadores de las redes neuronales desarrollaron una serie de métodos para el entrenamiento de redes poliestratificadas. Se basan todos en ir modificando los pesos de las conexiones de cada estrato proporcionalmente a su contribución al error, con lo cual los pesos resultantes, al cabo de muchos ciclos de tal proceso, convergen y producen una red que da los resultados adecuados. El conjunto de pesos de conexión así obtenido no es único, sino que dependerá del conjunto de pesos aleatorios que se tome como punto de partida; no obstante, cualquiera de las soluciones halladas hará que la red responda correctamente a las entradas de entrenamiento.

En teoría, estos procedimientos pueden embarrancar en lo que se denomi-

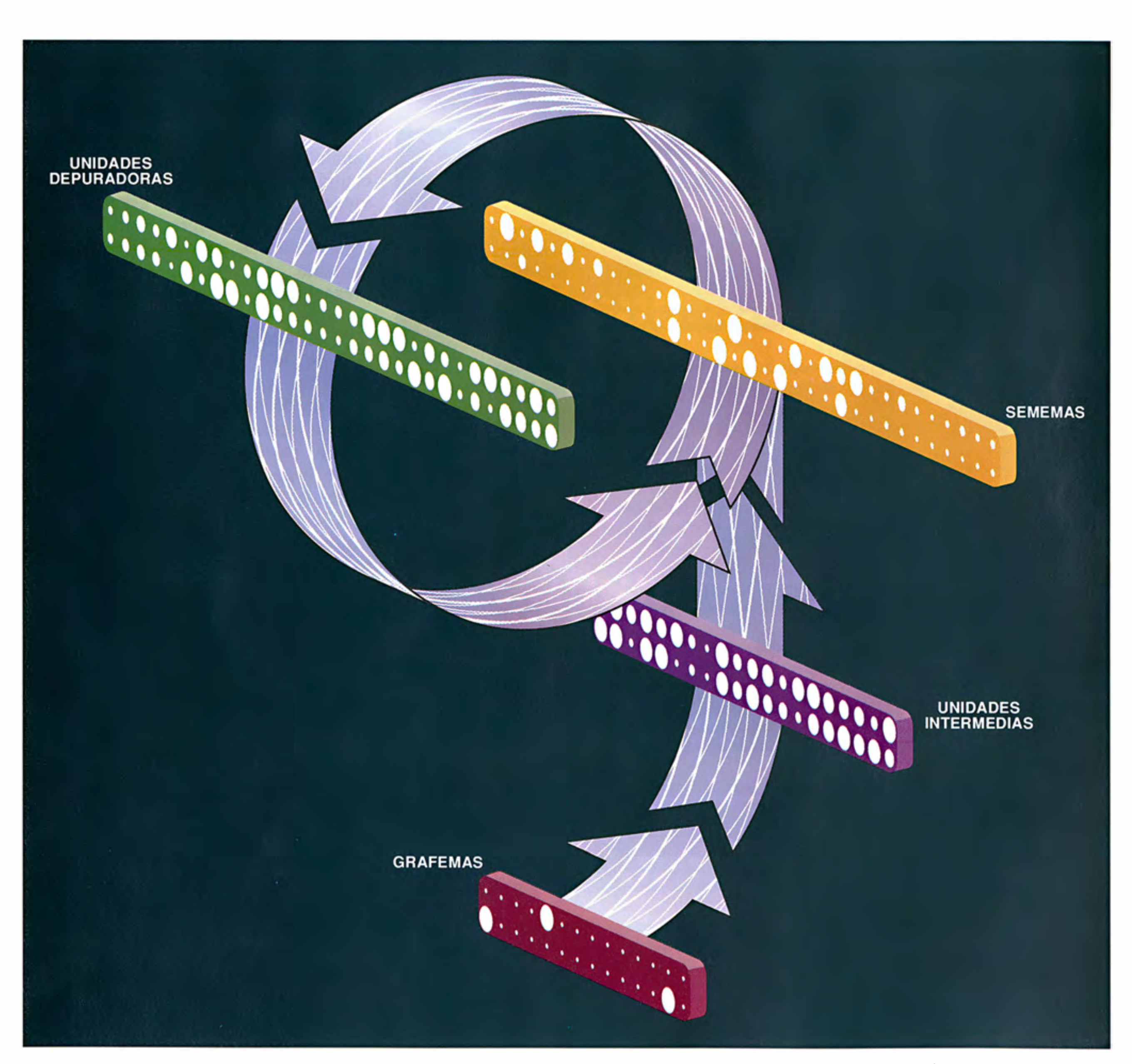


3. NEURONA IDEAL, base de la red neuronal artificial. A su entrada suma las señales ponderadas que recibe de otras neuronas (*abajo*) y genera un nivel de actividad entre 0 y 1 para transferirlo a otras neuronas a través de conexiones ponderadas. El conjunto de conexiones y pesos de una red neuronal determina su comportamiento.

na “mínimos locales”, esto es, configuraciones de pesos tales que, aun siendo incorrectas, cualquier cambio introducido en ellas provocaría que la red se comportase peor. Pero en la práctica esto casi nunca sucede, pues las soluciones que aprende la red se aproximan mucho a la óptima. Por añadidura, varios de los esquemas de aprendizaje tienen una mayor base biológica, si bien no parece que nuestros resultados dependan del método utilizado. Llegamos a sospechar que, aunque el proceso de aprendizaje en el cerebro fuese muy diferente, las conexiones neuronales resultantes seguirían asemejándose a la estructura creada en nuestra red. Puede entonces ser correcta la representación de las agresiones infligidas a la red, aun cuando no lo sean sus procedimientos de aprendizaje.

Esta red inicial, con un solo estrato intermedio, podía aprender a cartografiar formas de palabra con respecto a sus atributos semánticos. Pero no a entera satisfacción: presentaba marcada tendencia a relacionar ingresos muy similares (tales como *gato* y *gota*) con egresos también análogos, a menos que se sometiera a un entrenamiento demasiado prolongado. Para salvar el escollo, añadimos a la red otro estrato de unidades de neuronas que podríamos llamar “depuradoras” (*cleanup*), las cuales modificarán la respuesta imprecisa dada por el conjunto de conexiones original para llevarla a su valor semántico correcto. Como el número de significados de una palabra es limitado, la vía procedente de la entrada sólo necesita activar los sememas que disten menos del significado correcto que de cualquier otro. Las mismas técnicas de aprendizaje utilizadas en las redes de un solo estrato intermedio son también válidas para estratos múltiples, e incluso en redes con unidades interconectadas de una manera cíclica.

El modo más natural de realizar este mecanismo de depuración se vale de un bucle de retroinformación. El



4. RED NEURONAL DE LECTURA, que consta de cuatro estratos. El primero (el de “grafemas”), sensible a las letras de cada palabra, se conecta al de unidades intermedias, y éste a su vez a los sememas, convirtiendo así el dibujo de la palabra en una representación expresada en rasgos semánticos como tamaño, vitalidad o condición comestible. Las unidades depuradoras se conectan a los sememas por un bucle de realimentación que ajusta la salida de éstos al significado preciso de la palabra.

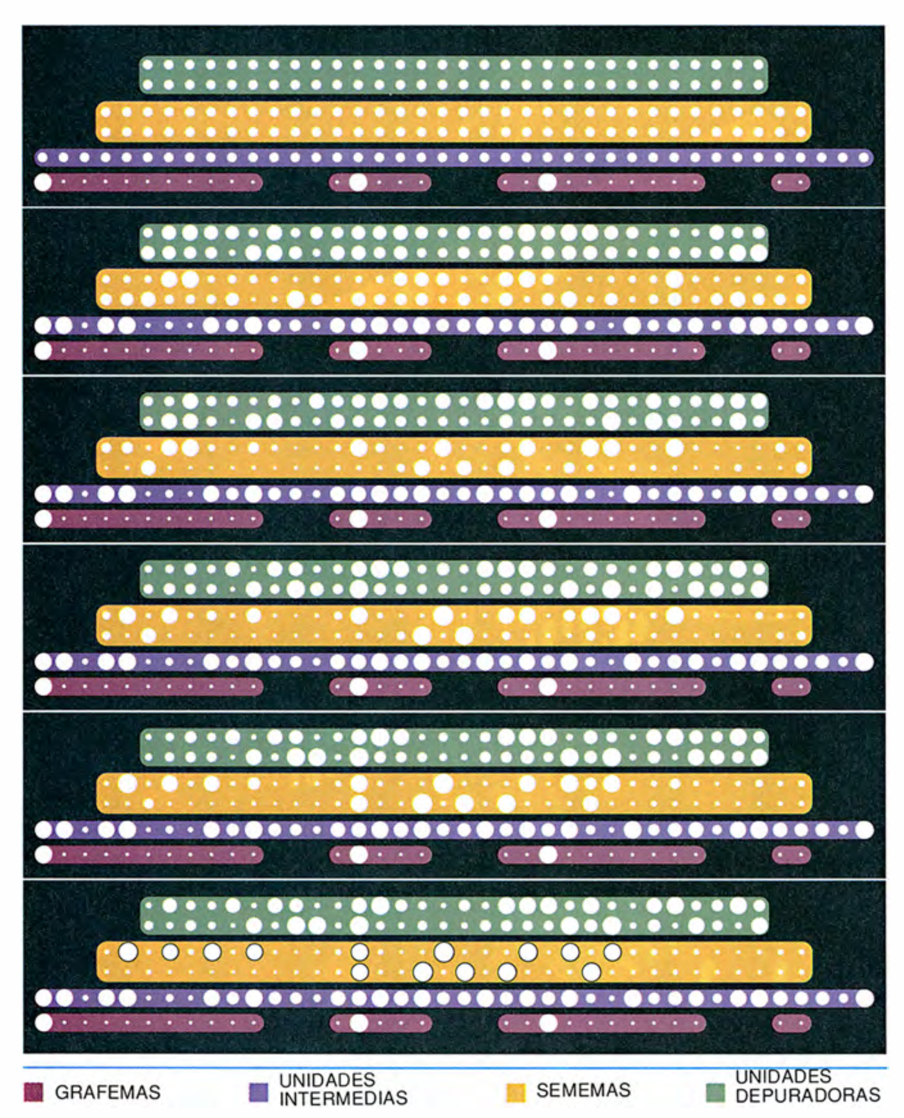
egreso de las unidades semema se hace pasar por las unidades depuradoras, tras lo cual vuelve a entrar en dichos sememas. En cada paso sucesivo por el bucle, la influencia de las depuradoras sobre los sememas —y también la recíproca— irá aproximando el patrón de características semánticas a su modelo correcto.

La introducción de este bucle aporta una nueva peculiaridad al comportamiento de nuestra red neuronal. En efecto, la red original era estática: a cada entrada en la misma le correspondía un patrón de salida determinado, y ese patrón no variaba mientras la entrada se mantuviera constante. En cambio, el egreso de la nueva red es dinámico, con tendencia a convertirse gradualmente en un patrón estable.

De esto hemos deducido que conviene concebir el egreso de la red, ya no como una lista de características semánticas activas, sino como un movimiento a través de un "espacio semántico" multidimensional, en el que las coordenadas expresen valores de todos los rasgos semánticos que pueda representar la red. Cada punto de dicho espacio corresponde a un patrón de actividad específico entre los sememas, pero solamente algunos de ellos expresarán significados válidos. Los significados correctos de palabras pasan entonces a ser puntos del espacio semántico.

Según tal concepción, los tres primeros estratos de la red se encargan de tomar la forma de una palabra y de convertirla en cierta posición del espacio semántico. A continuación, la actividad del estrato depurador traslada el egreso de la red hacia el punto que corresponda al significado más próximo. Los físicos y matemáticos llaman atractor puntual a la región que rodea a cada significado de palabra, de tal manera que, cuando el egreso inicial de la red se sitúe dentro de esa región, la red será inexorablemente atraída a una determinada posición en el interior de dicha zona.

Concebir el espacio semántico como una constelación de atractores que representen los significados de las palabras ha demostrado ser muy útil para comprender cómo opera la red y por qué cae en los mismos errores semánticos que las personas disléxicas. Por ejemplo, alterando al azar los pesos en el mecanismo de depuración de una red, los contornos del atractor de cada palabra variarán; por tanto, si la red se encuentra en una región del espacio semántico en la que anteriormente era atraída a una cierta palabra, puede ahora verse conducida a otra palabra que guarde relación semántica con la primera. Si, por el contrario, perturbamos la vía que proviene de la entrada, el egreso inicial de la red puede aproximarse más al significado de una palabra semánticamente afín que al de la palabra presentada en principio.

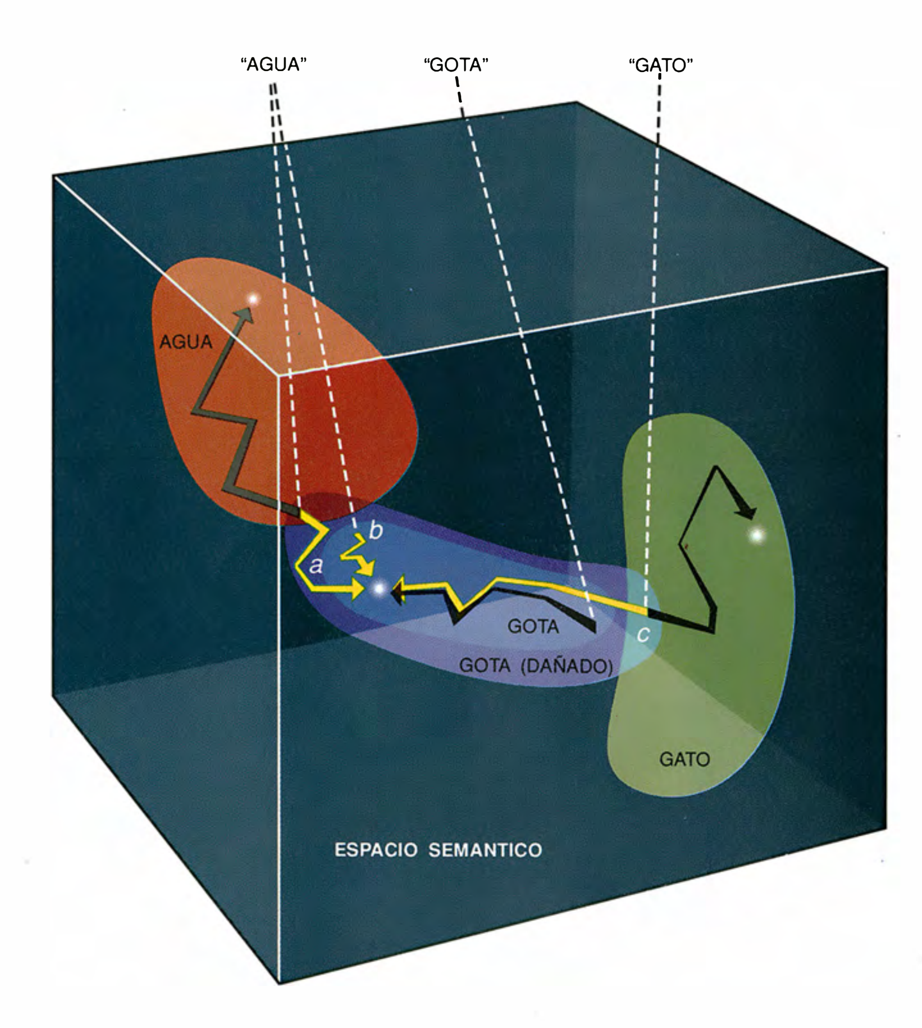


5. NIVELES DE ACTIVACION de las neuronas de la red. Varían con el tiempo (*de arriba abajo*) conforme va procesándose una palabra (en este caso, la inglesa *bed*, "cama"). Al principio, se activan muchos sememas en diversos grados, pero su interacción con las unidades depuradoras refuerza la actividad de unos y debilita la de otros hasta que la salida converge.

El resultado expuesto deshace uno de los primeros enigmas que planteaba la dislexia profunda: por qué una lesión en cualquier punto de la ruta semántica del cerebro produce un patrón esencialmente similar de lecturas erróneas. Los neurólogos, entre otros, se preguntaban cómo podría causar errores semánticos una lesión cercana a la entrada, esto es, a la parte visual del sistema lector. Según nuestro modelo, tales errores se originan de manera natural al utilizar las neuronas depuradoras la información semántica para tratar de dar sentido al egreso de las dañadas etapas anteriores.

La noción de atractor ayuda a explicar también otra anomalía observada. Casi todos los pacientes propensos a errores semánticos inciden también en ciertos errores visuales, tales como confundir palabras de morfología análoga (*gato* y *gota*, por ejemplo). No incurren, sin embargo, en los fallos característicos de los disléxicos superficiales ("cielo" por *celo*). Esta invariable asociación de errores semánticos con errores visuales parece extraña, pues debe de haber pacientes que solamente sufran lesión en las últimas etapas de sus sistemas de procesamiento, y por pura intuición cabría esperar que cayeran en puros errores semánticos.

Una vez construido el modelo de red neuronal, descubrimos con sorpresa



6. EL ESPACIO SEMANTICO tiene muchas dimensiones que expresan características semánticas (aquí se muestra una mera aproximación tridimensional). A cada significado de palabra le corresponde un punto del espacio. Cuando la red descrita lee, la interacción entre las unidades semema y las unidades depuradoras hace que toda forma de palabra cartografiada en una región próxima a un significado (*zonas en color*) converja hacia el mismo (*puntos*). Si se deteriora la red de modo que se desplacen los contornos de los atractores, puede leerse en vez de una palabra otra semánticamente análoga, tal como "gota" por *agua* (*a*). También pueden darse errores semánticos si el daño hace que la forma de palabra se cartografíe en un punto del espacio ligeramente distinto (*b*). Esta red puede cometer errores visuales porque las palabras de aspecto semejante se cartografiarán inicialmente en puntos cercanos del espacio semántico, aun cuando estén muy separados los puntos estables de los atractores donde han ido a parar (*c*).

que un daño en el circuito depurador semántico a veces provoca errores visuales. Más tarde comprendimos el porqué: los primeros estratos de una red inalterada pueden tolerar que las palabras *gato* y *gota* produzcan salidas semánticas bastante parecidas, dado que existe un estrato depurador que dirigirá cada uno de estos sememas a su significado correcto. En cambio, cuando dicha etapa depuradora se ha perturbado y han variado las formas de todos los atractores, el egreso de los sememas puede caer dentro del atractor que corresponda a una palabra visualmente similar, pero sin relación semántica alguna.

Tal explicación no se nos ocurrió al principio, porque descansa en la idea de que los contornos de los atractores de *gato* y *gota* puedan aproximarse mucho entre sí, aun cuando las dos palabras mantengan gran diferencia semántica. Lo lógico sería que entre uno y otro atractor se interpusieran los de muchos otros significados, parecer intuitivo que es correcto, al menos, en un espacio bidimensional: si escogemos al azar 40 puntos para representar significados de palabras y construimos atractores compactos en torno de cada uno, no habrá en ninguna parte aproximación entre los atractores de significados dispares.

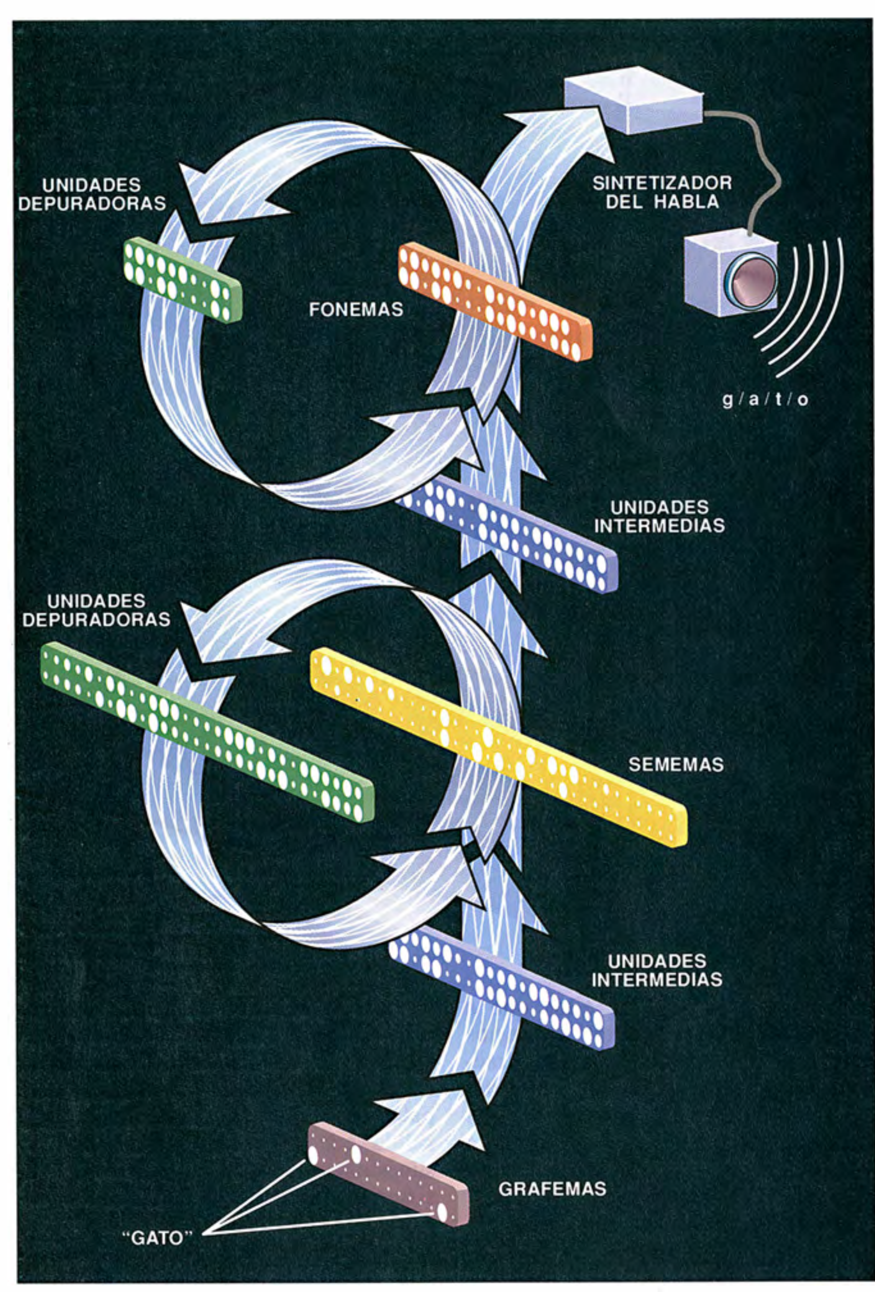
Sin embargo, es muy peligroso suponer que sucede lo mismo en espacios de múltiples dimensiones. Nuestra red representa 68 características semánticas en sus sememas, y por tanto los atractores que corresponden a cada una de las 40 palabras se alojan en un espacio de 68 dimensiones. En tal espacio es fácil salvar los obstáculos, y el punto medio entre dos puntos cualesquiera elegidos al azar está casi con certeza más próximo a cada uno de ellos que a ninguno de los 38 puntos aleatorios restantes. En consecuencia, los atractores de *gato* y *gota* pueden tener una frontera común, sin que ningún otro atractor se interponga. Resulta fácil evitar los obstáculos en un espacio de 68 dimensiones.

Aunque nuestra red era capaz de mimetizar la conversión, la disfuncional y la correcta, de formas de palabras en significados, no por ello iba a ser ésa la única arquitectura posible de la ruta semántica del cerebro. Para determinar el abanico de alternativas existentes, investigamos los efectos de una lesión sobre diferentes arquitecturas, cada una de las cuales había sido diseñada para evaluar un aspecto de la red original.

Para ello, elaboramos unas versiones de la red neuronal con los sememas interconectados y otras versiones carentes de tales conexiones; programamos, asimismo, unas redes que tenían cada una de las neuronas de un estrato conectadas a todas las neuronas del estrato siguiente, y otras redes en las que escaseaban las conexiones interneuronales. Se situaron las unidades de depuración de suerte tal que trabajasen por delante de los sememas y además estuvieran combinadas con el estrato intermedio. Llegamos incluso a modificar la disposición de las neuronas en el estrato de entrada con el fin de alterar el modo de representar las palabras, amén de añadir una red de salida que convertía significados en sucesiones de fonemas, con lo que el sistema realmente hablaba.

La mayoría de los detalles de arquitectura no vienen al caso. Apenas si importa la manera particular de representar un ingreso visual, siempre que las palabras que se asemejen visualmente produzcan pautas de actividad parecidas en el estrato de entrada. El único elemento crucial es la existencia de atractores: si no hubiera unidades depuradoras "más allá" del área dañada, la red no presentaría el patrón de errores típico de la dislexia profunda.

Conviene resaltar que nuestra red no sólo reproduce los obvios fallos visuales y semánticos propios de la dislexia profunda, sino que además remeda algunas de las características más sutiles del trastorno. Por ejemplo, los pacientes cometen a veces errores "visuales y luego semánticos", en los cuales una confusión semántica sigue a otra visual. Así G. R. leía como "orquesta" la palabra *sim-*



7. LA RED PARLANTE añade a la red lectora original otro juego de tres estratos, cuya función es convertir las representaciones semánticas en secuencias de fonemas que alimentan un sintetizador vocal. Esta red no exige determinar qué palabra pueda corresponder a un patrón semántico alterado como el que genera una red manipulada para la simulación de dislexia.

patía: es de suponer que a través de *sinfonía*. Y redes como la nuestra reproducen también este tipo de errores, leyendo a veces "agua" donde dice *gato*, a través de *gota*.

Cuando está gravemente dañada, la red presenta también un extraño efecto, manifestado en pacientes con lesiones tan grandes que distorsionan sus representaciones semánticas hasta hacerlas irreconocibles y no poder expresarlas en palabras. Con frecuencia tales sujetos, aun no pudiendo identificar la palabra que intentan leer, sí la encajan dentro de una categoría; por ejemplo, "animal" en "comida". En circunstancias semejantes, la red no se estabiliza ya en el atractor correspondiente a una cierta palabra —por supuesto, se habrán mezclado los atractores de varias palabras—, sino que alcanza un egreso estable dentro de un volumen mayor del espacio semántico, donde residían antes la palabra correcta y sus afines. Vemos, pues, que todavía es posible determinar la categoría de una palabra.

Un síntoma de la dislexia profunda no abordado inicialmente por nuestros modelos es la dificultad que manifiestan los pacientes en leer términos abstractos, mayor que la mostrada en términos concretos. Este fenómeno parece ser parte integrante del síndrome, dado que la abstracción —en sí, una propiedad semántica— incrementa la probabilidad de errores visuales. Más aún, las respuestas que suelen dar estos pacientes tienden a ser más concretas que el término que originalmente se les ha presentado.

Para simular este efecto nos hemos basado en la tesis sostenida por Gregory V. Jones, de la Universidad de Warwick, y otros colegas, según la cual los términos concretos son más fáciles para disléxicos profundos porque evocan un significado preciso y coherente. En lo que a nuestra red se refiere, una palabra concreta posee más peculiaridades semánticas que otra abstracta. Comparemos, por ejemplo, las palabras *poste* y *pasado* (en inglés, *post* y *past*, muy cercanas y por tanto de fácil confusión para un disléxico). La primera tiene 16 características, que van desde "longitud de medio metro a dos metros" hasta "utilizado en juegos o deportes", mientras que a la segunda le corresponden dos atributos escuetos: "tiene duración" y "se refiere a un tiempo anterior". Mediante el diseño de un nuevo vocabulario con 20 pares de palabras de cuatro letras, cada par formado por una palabra concreta y otra abstracta que sólo difieren en una letra, hemos confirmado que las concretas tienen, en promedio, el cuádruplo de rasgos semánticos que las abstractas.

Una vez entrenada la red en pronunciar las palabras, nos encontramos con que las lesiones en una parte cualquiera de la misma situada "más acá" de las unidades depuradoras reproducían los efectos de la abstracción. Las palabras concretas originan menos errores porque hay mayor redundancia en sus pautas de actividad semántica, y en consecuencia existe una mayor estructura utilizable por las unidades depuradoras para guiar la convergencia de la red hacia el significado correcto. En cambio, las palabras abstractas disponen de menor redundancia semántica y, por ello, tienen una mayor dependencia de la vía de información previsora (*feedforward*), en la que predominan los influjos visuales.

Dado que el correcto reconocimiento de las palabras concretas se apoya más en el circuito depurador, un trastorno grave provocado en el mismo conduce a una sorprendente inversión: la red dañada lee las palabras concretas peor y comete en ellas más errores visuales que en las palabras abstractas. Este tipo de lesión y de pauta de comportamiento concuerda con lo que se sabe acerca de un único

y enigmático paciente, afectado de "dislexia a las palabras concretas", que ha estudiado Elizabeth K. Warton, del Hospital Nacional de Londres. Además de leer con mucha mayor dificultad las palabras concretas que las abstractas, ese sujeto lograba una mejor asociación de las palabras abstractas habladas con sus imágenes. Esta coherencia de comportamiento sugiere que su problema residía en el nivel del sistema semántico.

Nuestra descripción de los errores típicos de la dislexia profunda descansa en las propiedades de una red neuronal que transforma una representación (forma visual de una palabra) en otra representación (conjunto de rasgos semánticos) arbitrariamente relacionada con ella. Cabe esperar que se obtengan patrones de error semejantes cuando se lesionan otros procesos cognitivos que conllevan una transformación arbitraria hacia un espacio semántico, o desde el mismo. Los neuropsicólogos han descrito ya tipos de error algo similares en la disgrafía profunda (defectos de escritura), y en la disfasia profunda (defectos de repetición de palabras).

Esta prueba adicional sugiere que la validez de nuestro modelo puede ser mucho más amplia de lo que en principio se creyera. Pero, sobre todo, señala el logro de una nueva técnica para comprender cómo funciona el cerebro. Se diferencia de otras explicaciones dadas a la dislexia profunda —y, salvo pocas excepciones, a otros fenómenos neuropsicológicos— en el tipo de hipótesis de partida. En lugar de caracterizar verbalmente cada componente de un complejo mecanismo neuronal y tratar de intuir el efecto de los daños sobre su comportamiento, nosotros simulamos ese mecanismo, lo dañamos y vemos luego qué pasa, habiendo así descubierto la falsedad de muchas ideas preconcebidas. La lección aprendida es que las simulaciones por computador van a desempeñar un papel crucial para comprender mejor el procesamiento normal de la información lingüística por parte del cerebro y las alteraciones que sufre tal función a causa de heridas o enfermedades.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

LESIONING AN ATTRACTOR NETWORK: INVESTIGATIONS OF ACQUIRED DYSLEXIA. G. E. Hinton y T. Shallice en *Psychological Review*, vol. 98, n.º 1, páginas 74-95; enero de 1991.

DEEP DYSLEXIA: A CASE STUDY OF CONNECTIONIST NEUROPSYCHOLOGY. D. C. Plaut y T. Shallice en *Cognitive Neuropsychology*, vol. 10, n.º 5, octubre de 1993.

La recuperación del *Vasa*

Este buque de guerra sueco se fue a pique tras su botadura. Durante tres siglos ha yacido en el fondo del puerto de Estocolmo. Contamos aquí la historia de su recuperación

Lars-Åke Kvarning

En los años veinte del siglo XVII europeo, Gustavo Adolfo II, rey de Suecia, iba camino de convertirse en uno de los principales señores de la guerra: controlaba Finlandia, Estonia y Livonia y acababa de conquistar la pequeña porción de Rusia que se asoma al golfo de Finlandia. Cerrándole así al zar la salida al Báltico, había hecho de este mar un lago sueco. Para asegurar su predominio, necesitaba mantener en el Báltico una flota disuasoria. De ahí que, en enero de 1625, encargase la construcción de cuatro barcos; magnífico entre todos fue el *Vasa*, bautizado con el nombre de la familia real sueca y uno de los mayores navíos de guerra de su tiempo.

El 10 de agosto de 1628, un día de radiante sol, se agolpaba la multitud en los muelles del puerto de Estocolmo para asistir a la primera andadura que lo había de llevar a la base naval, en una isla no muy distante de la ciudad. Treparon los gavieros por las jarcias para desplegar cuatro de las 10 velas del *Vasa* —trinquetilla, velacho, sobrejuanete y sobremesana—. Dispararon los cañones las salvas de salutación y en los muelles y riberas el gentío prorrumpió en vítores y aplausos al contemplar cómo aquel imponente bajel, polícroma mole que refulgía llena de dorados, empezaba a moverse al impulso de la leve brisa.

De pronto, los vítores se convirtieron en gritos de horror: una repentina ráfaga de viento volvió a meter al buque en la rada, yendo a chocar ya muy escorado contra el malecón. Aunque recobró por unos momentos el equilibrio, fue sólo para escorarse otra vez, tanto que el agua le entró a raudales por las abiertas cañoneras. Instantes después, el *Vasa* se había hundido "con su velamen, sus grímpolas y gallardetes y todo lo que llevaba encima", según el Consejo del Reino describió el desastre en una carta al rey. "Se dice, anotaba el embajador danés Erik Krabbe, que se han ahogado más de cincuenta personas, entre ellas algunas mujeres y niños que quisieron ir con sus maridos y padres al archipiélago."

Los restos del *Vasa*, encontrados tres siglos más tarde, fueron reflotados y restaurados, convirtiendo el buque en un monumento a sus armadores y también a sus rescatadores. La resurrección de este navío de guerra mereció la pena tanto por el intrínseco interés de la operación misma como porque la pieza tiene muchísimas cosas que decirnos acerca de sus constructores.

Que uno de los mayores navíos de guerra de Europa se perdiese nada más echar a andar dentro de las seguras aguas de un puerto constituyó una catástrofe que reclamaba algún chivo expiatorio. El capitán de la nave, Söfring Hansson, y otros oficiales fueron sometidos a interrogatorio muy poco después de haber sido salvados del siniestro. El armador, Henrik Hybertson, había muerto el año anterior, y la responsabilidad de completar el proyecto fue asumida por la viuda y por un hermano del difunto en cooperación con el encargado de obra Hein Jacobson. Estas personas hubieron de someterse también al interrogatorio.

¿Habían quedado afianzados los cañones? Quienes dirigieran la operación no pudieron demostrarlo, pero en el verano de 1961 los arqueólogos comprobarían que las cureñas de los cañones estaban en su debido sitio, con los restos de las cuerdas que las sujetaran ceñidos aún en torno a los ejes. ¿Se habían cargado bien las piedras de lastre? Un testigo contestó afirmativamente y señaló que el espacio destinado al lastre, en el último pañol del fondo, se llenó de piedras.

Pero la lectura entre líneas percibe cabos sueltos. Göran Mattson, patrón del buque, relató que el vicealmirante y el capitán del *Vasa* habían comprobado la estabilidad del barco, mientras lo lastraban, haciendo que 30 hombres corrieran de un lado a otro de la cubierta superior. A la tercera vuelta tuvieron que darles la voz de alto para evitar que el *Vasa* zozobrase allí mismo. Estaba claro que había errores de construcción; nadie los remedió.

Repasando las actas, se deduce que la mayoría de los observadores creían que el compartimiento destinado al



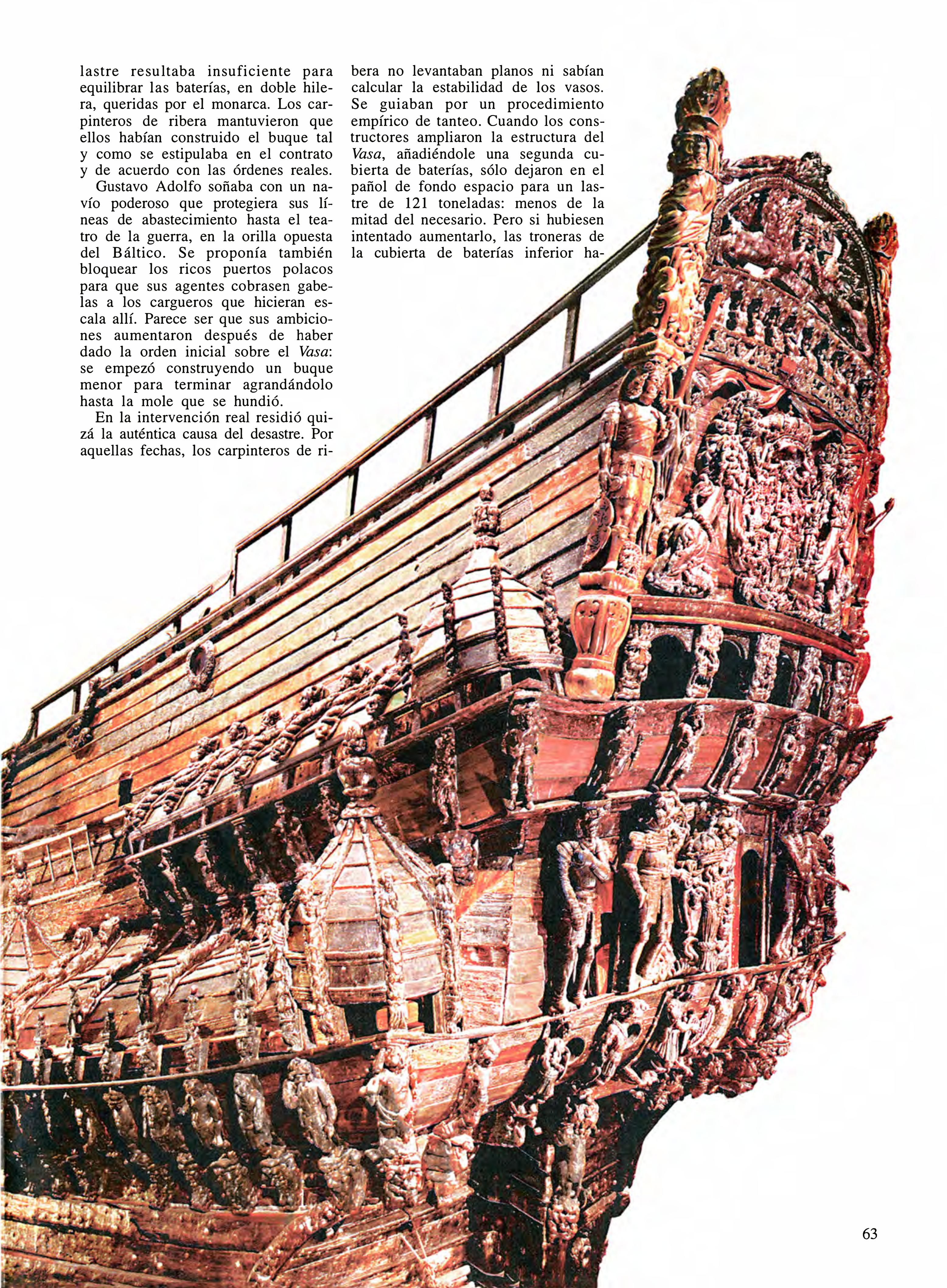
1. MAGNIFICENCIA del *Vasa* evidenciada en su castillo de popa, ornamentado con símbolos regios: una corona, un escudo de armas y unos mitológicos grifos.

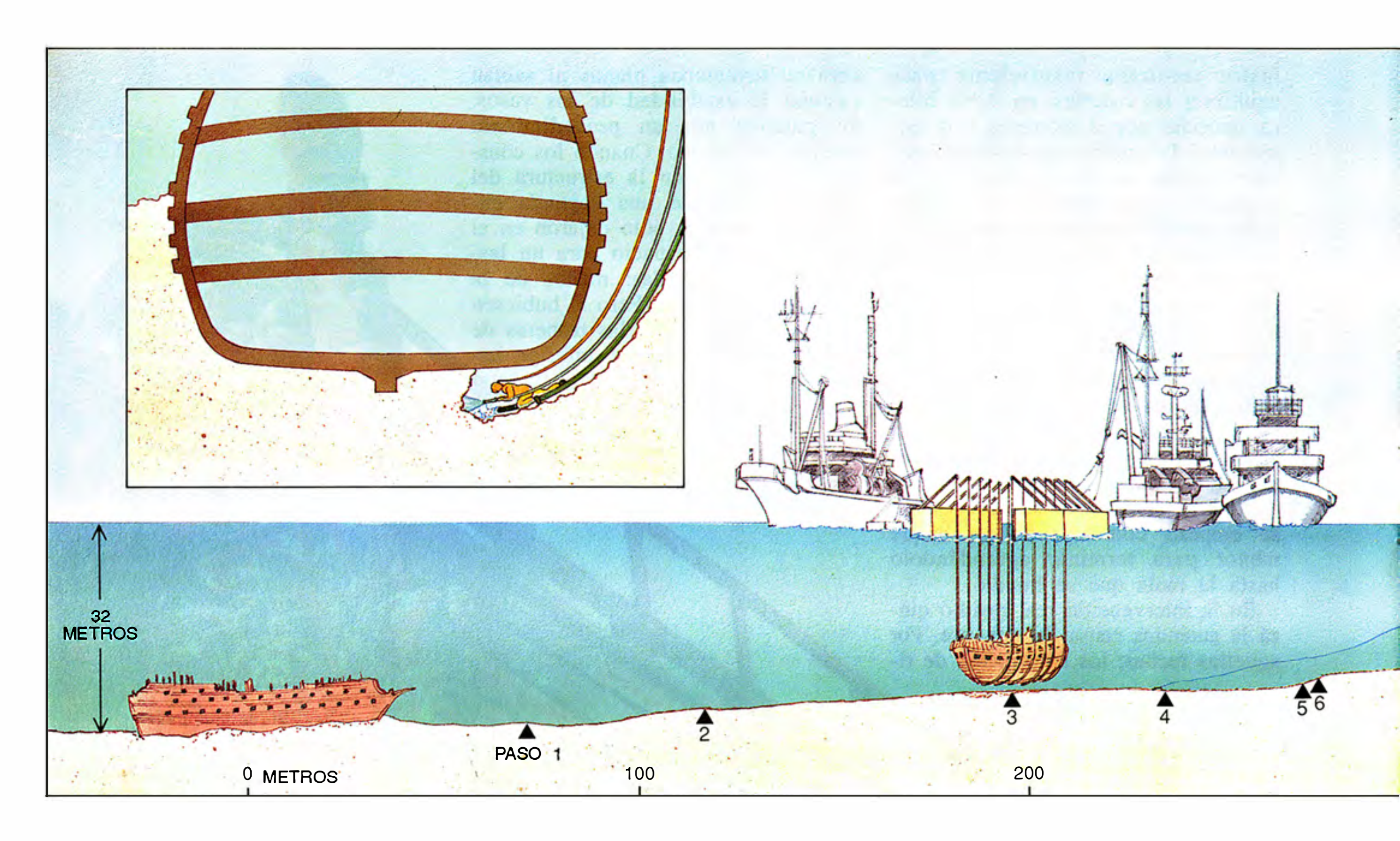
LARS-ÅKE KVARNING, capitán reservista del regimiento de granaderos de la Guardia Real, preside los museos nacionales marítimos de Suecia y dirige el Museo Vasa de Estocolmo, donde viene trabajando desde 1964.

lastre resultaba insuficiente para equilibrar las baterías, en doble hilera, queridas por el monarca. Los carpinteros de ribera mantuvieron que ellos habían construido el buque tal y como se estipulaba en el contrato y de acuerdo con las órdenes reales.

Gustavo Adolfo soñaba con un navío poderoso que protegiera sus líneas de abastecimiento hasta el teatro de la guerra, en la orilla opuesta del Báltico. Se proponía también bloquear los ricos puertos polacos para que sus agentes cobrasen gabelas a los cargueros que hicieran escala allí. Parece ser que sus ambiciones aumentaron después de haber dado la orden inicial sobre el *Vasa*: se empezó construyendo un buque menor para terminar agrandándolo hasta la mole que se hundió.

En la intervención real residió quizá la auténtica causa del desastre. Por aquellas fechas, los carpinteros de ribera no levantaban planos ni sabían calcular la estabilidad de los vasos. Se guiaban por un procedimiento empírico de tanteo. Cuando los constructores ampliaron la estructura del *Vasa*, añadiéndole una segunda cubierta de baterías, sólo dejaron en el pañol de fondo espacio para un lastre de 121 toneladas: menos de la mitad del necesario. Pero si hubiesen intentado aumentarlo, las troneras de la cubierta de baterías inferior ha-





brían descendido hasta quedar peligrosamente a nivel del agua.

Otros testigos abundaron en el interés personal del rey en su construcción. Cuando se le preguntó al jefe de obras a quién o a qué había que achacar el desastre, exclamó suspirando: "¡Sólo Dios puede saberlo...!" Con Dios y el rey así implicados, únicamente quedaba una salida: se sobreseyó el asunto.

Un buque de ese porte, equipado con cañones de bronce que costaban una fortuna, no podía dejar de convertirse en inmediato objeto de rescate. Sólo tres días después de la calamidad, el Consejo del Reino autorizó a Ian Bulmer su intento. Pero tuvo poco éxito. Aunque eran bien conocidos los principios por los que se han de regir tales operaciones, los equipos de rescate carecían de la fuerza necesaria para elevar una pieza tan pesada.

En 1663, cinco años después de que se desarrollara la campana de buzo, que permitió el acceso a los fondos marinos, entró en escena Albrect von Treileben. Equipados con tal artefacto, este sueco y sus buzos recuperaron los cañones y algunos otros objetos de valor. El buzo se embozaba un mono de cuero para protegerse del frío, se subía a una plataforma suspendida bajo la campana y mantenía la cabeza y el pecho dentro de la burbuja de aire; la campana descendía entonces hasta los restos del barco hundido.

Francesco Negri, sacerdote y explorador italiano que fue testigo ocular de las operaciones realizadas por von Treileben, dejó a la posteridad este testimonio:

> Cuando, habiendo dado él la señal, se le sacó a la superficie después de haber estado bajo el agua por lo menos un cuarto de hora, trajo consigo una pesada plancha de roble llena de ajustes de hierro que había enganchado con el garfio. Le pregunté, a través de un intérprete, si podría haber permanecido allí abajo algún tiempo más. Dijo que sí, pero que sólo hasta una media hora. Era posible —según creo, aunque me olvidé de preguntárselo— que con su respiración se hubiera calentado en exceso el aire encerrado en la campana, y probablemente el agua le habría atormentado excesivamente las piernas con el frío. El hombre temblaba, aunque había nacido en el país y era fuerte y avezado al esfuerzo físico. Sucedía esto a finales de octubre del pasado año de 1663.

Mientras estaba abajo, el buzo apenas podía moverse y era incapaz de ver nada. Así y todo, aquel equipo de rescate se las arregló para ir sacando la mayoría de los 64 cañones del *Vasa*, incluidos 48 del 24, cada uno de los cuales pesaba más de una tonelada. El resto tenía poco interés para la gente de entonces, por lo que se lo dejaron al mar, poniendo fin a una operación de rescate que fue, quizá, la más imponente empresa submarina de la era premoderna.

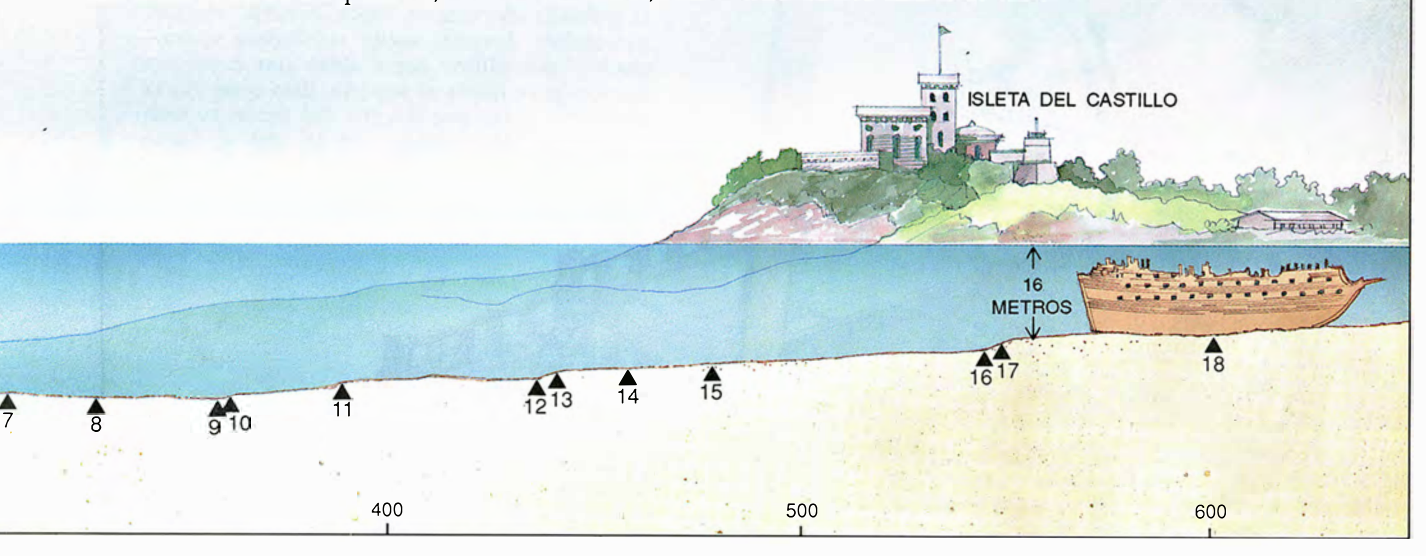
Aquellos buzos demostraron arrojo. El limitado suministro de aire abreviaba sus tiempos de inmersión lo bastante como para impedir que, a alta presión, se les disolvieran cantidades peligrosas de nitrógeno en sangre; de cumplirse ese riesgo, un brusco retorno hubiera causado la precipitación del gas en burbujas, trastorno fatal conocido por "enfermedad del buzo".

El *Vasa* permaneció en el olvido hasta que, en 1956, Anders Franzén localizó el pecio en el fondo del puerto de Estocolmo. Cayó este rastreador privado en la cuenta de que la baja salinidad del Báltico impide que medre *Teredo navalis*. Libre de esa carcoma el armazón de madera se habría conservado extraordinariamente bien entre aquellas aguas. Los despojos del Báltico no tienen parangón: por ningún otro mar de pareja salinidad han circulado tantas flotas.

Franzén se había especializado en barcos de guerra de los siglos XVI y XVII. Estudió los archivos y recogió datos sobre las posiciones de 12 navíos hundidos que despertaron su interés, y se centró en el *Vasa*. Un buen día, mientras garraba su rezón en el puerto de Estocolmo, enganchó en algo voluminoso e inmóvil. Bajaron allá unos submarinistas y confir-

Así se reflotó el *Vasa*

Buzos provistos de bombas inyectoras de agua perforaron seis túneles en el lodo del suelo, por debajo del buque (*recuadro de la izquierda*); después hicieron pasar por esos túneles unos cables de acero cuyos extremos fueron fijados a grúas enclavadas en dos pontones paralelos: el pecio quedó atrapado en la jaula formada por los cables. Vaciando los pontones, se izaba el barco 2,5 metros, remolcándolo hacia la playa. Cuando el pecio se asentaba otra vez sobre el fondo, se llenaban nuevamente los pontones, se retensaban los cables y se repetía el proceso. Después de 18 de estos pasos, se llegó a aguas someras. Allí, tras dos años de preparación, las grúas montadas en los pontones sacaron el buque a la superficie. Así se reflotó el *Vasa*.



maron que un enorme casco yacía sobre su quilla en el fondo. ¡Era el *Vasa*! En él y a su alrededor estaban esparcidos 25 esqueletos humanos. Unos fueron hallados en el interior durante la excavación, pero la mayoría los encontraron los obreros al limpiar la parte externa e inferior del casco una vez reflotado el buque.

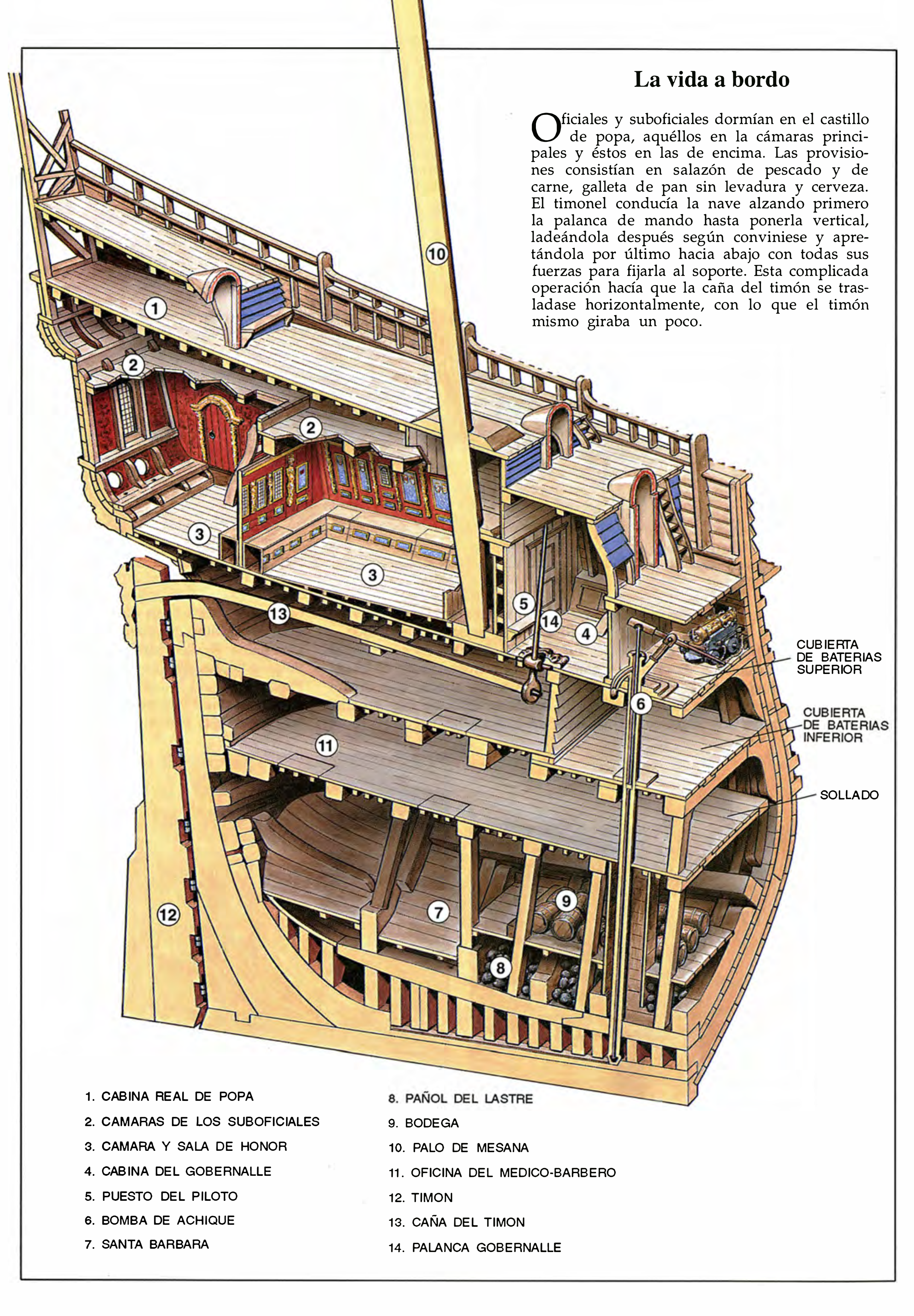
En su empeño, Franzén consiguió ganarse a dos importantes colaboradores: la Armada sueca, que organizó el entrenamiento de sus escafandristas en torno a las necesidades del proyecto, y la Compañía de Navegación Broströms, mediante su filial la Compañía Rescatadora Neptuno, que emprendió los trabajos gratuitamente. Para salvar la tablazón durante el rescate, se introdujeron cables a través de túneles perforados en el lecho



2. IZADO, el casco del *Vasa* siguió manteniéndose entero gracias a las cuñas de madera de su ensamblaje original. Los pernos y clavos de hierro habían sido destruidos por el orín muchos años antes.



3. CON UNA DUCHA CONTINUA de polietilen glicol se estuvo impregnando el *Vasa* durante un período de 18 años. Los objetos de menor tamaño fueron tratados mediante inmersión en baños, de más breve duración.



La vida a bordo

Oficiales y suboficiales dormían en el castillo de popa, aquéllos en la cámaras principales y éstos en las de encima. Las provisiones consistían en salazón de pescado y de carne, galleta de pan sin levadura y cerveza. El timonel conducía la nave alzando primero la palanca de mando hasta ponerla vertical, ladeándola después según conviniese y apretándola por último hacia abajo con todas sus fuerzas para fijarla al soporte. Esta complicada operación hacía que la caña del timón se trasladase horizontalmente, con lo que el timón mismo giraba un poco.

1. CABINA REAL DE POPA
2. CAMARAS DE LOS SUBOFICIALES
3. CAMARA Y SALA DE HONOR
4. CABINA DEL GOBERNALLE
5. PUESTO DEL PILOTO
6. BOMBA DE ACHIQUE
7. SANTA BARBARA
8. PAÑOL DEL LASTRE
9. BODEGA
10. PALO DE MESANA
11. OFICINA DEL MEDICO-BARBERO
12. TIMON
13. CAÑA DEL TIMON
14. PALANCA GOBERNALLE

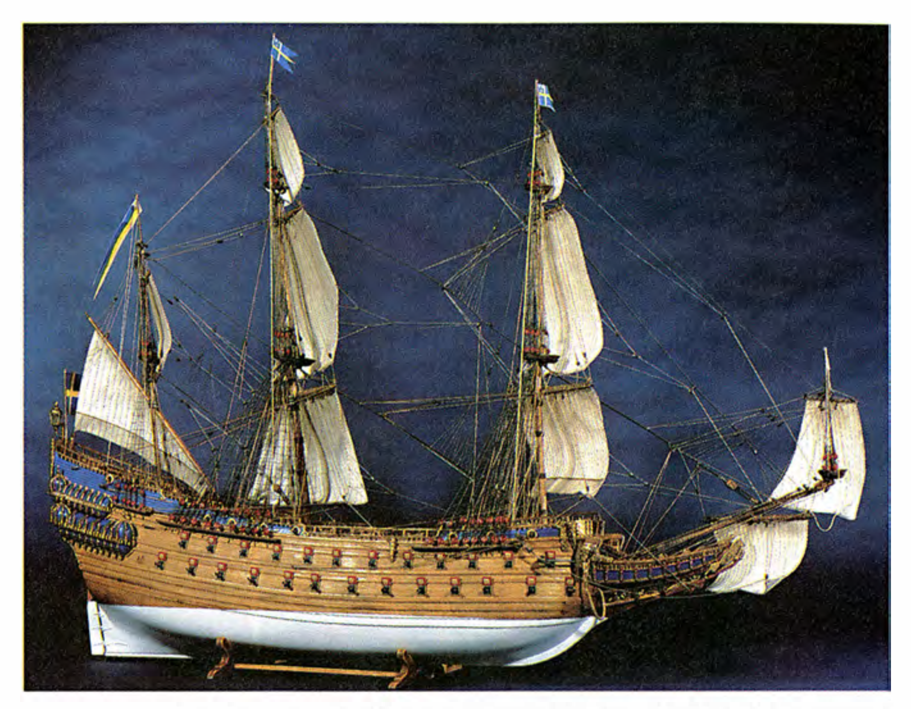
marino mediante dos cañones de agua de doble boca ("inyectores *Zetterström*"). El chorro que sale por la boca anterior abre camino atravesando el lodo a la vez que el chorro más débil de la boca posterior mitiga el rebote y va apartando el material suelto. Los submarinistas tuvieron que trabajar dentro de los túneles, con cuatro metros de fango y cieno y un pecio de 333 años de antigüedad y 32 metros de agua directamente encima de sus cabezas. Su peor pesadilla era pensar que la nave podría ceder bajo el peso de las piedras de lastre acumuladas dentro, atrapándoles a ellos en sus boquetes.

Hubo un momento de tremenda emoción cuando el *Vasa* quedó por fin acomodado en la jaula que formaban los cables de acero, a punto para recibir el tirón que lo liberaría del lodo que lo aprisionaba. Con bombas se vaciaron los pontones sujetos a los cables que, al flotar, estiraron los cables hasta que éstos se tensaron como cuerdas de violín. Las arenas del fondo soltaron finalmente a su presa, y el *Vasa* colgó libre entre los cables. Esta suspensión sometió el casco a un gran esfuerzo, que lo habría destrozado de no haber mantenido su consistencia el viejo maderamen de roble. Ahora tendría que hacerse todo con mucha suavidad.

Como los pontones sólo podían izar el *Vasa* 2,5 metros por vez, hubo que dividir el proceso en 18 pasos. A cada poco que era alzado el buque, lo atoaban hacia aguas más someras e inundaban los pontones hasta que descansaba de nuevo sobre el fondo. Todavía se aprecian las impresiones dejadas por el *Vasa* en cada una de estas fases; parecen pisadas de un gigante en la pantalla del sonar.

El buque llegó por fin a un punto donde podía acometerse bien el último ascenso. Grandes grúas montadas sobre los pontones guindaron la nao hasta la superficie; allí se vació el casco con las bombas de achique instaladas en su interior. Asistido de este modo, el *Vasa*, flotando sobre su propia quilla, entró al dique seco, donde le aguardaba un pontón de hormigón armado. Al cabo de 333 años, volvía a exhibirse, majestuoso, ante un público que lo contemplaba embelesado.

Para proteger la tablazón empapada, sus cuidadores lo rociaron sin cesar con agua hasta que se le pudiese proporcionar una conservación permanente dentro de un refugio apropiado. También fue necesario eliminar el fango que se había ido amontonando en el buque —un cieno negruzco cargado de piezas arqueológicas y, quizá, de bacterias. Para actuar sobre seguro, a los arqueólogos que iban a abordar su exploración se les vacunó contra el tétanos, el tifus y otras enfermedades contagiosas. Así protegidos, encontraron y registraron unos 25.000 objetos, de los que alrededor de la mitad provenían de la estructura del buque.



4. MODELO DEL *VASA*, cuya construcción, a la décima parte del tamaño original, tuvo ocupados durante cuatro años a cuatro especialistas. Ahora está expuesto junto al casco original reconstruido, en el Museo Vasa de Estocolmo.

Todos los hallazgos habrían de ser restituidos a sus lugares correspondientes durante la reconstrucción, la finalidad de la cual era devolver al *Vasa* su forma y aspecto originales. En el otoño de 1961 se construyó un pabellón de aluminio en torno al *Vasa*, que seguía aún en el pontón. Luego, éste se remolcaría hasta un museo provisional para proseguir los trabajos. El reto técnico consistía en remplazar el agua que empapaba el maderamen con algo más duradero sin que la madera se agrietase, se contrajese o se estropease. Así había que conservar 1100 toneladas de elementos estructurales, además de 700 esculturas y ornamentos esculpidos y varios millares de objetos de tela, cuero y metal.

Bertill Centervall y Rolf Morén habían inventado un procedimiento para conservar madera recién cortada consistente en impregnarla con polietilen glicol (PEG), polímero que sustituía al agua en la madera fresca. Se diluyó el PEG en agua, se le añadió bórax y ácido bórico (contra las agresiones fúngicas) y se aplicó la mezcla a la madera. El PEG embalsama la madera: endurece las células, impidiendo que se doble, agriete o rompa. Se procuró una protección adicional mediante controles sistemáticos del clima que aseguraran una temperatura constante y un grado ideal de humedad.

Los objetos de madera de tamaños manejables fueron introducidos en grandes baños en los que la concentración y la temperatura de la solución podían irse aumentando paulatinamente. Este tratamiento, muy eficaz, se aplicó durante 18 meses al roble y cerca de un año a las maderas más blandas. Pero el casco del buque no era posible bañarlo así. Hubo que rociar el interior y el exterior con la solución, en un tedioso proceso de saturación que se inició en 1961, tres años antes de que me incorporara yo al equipo restaurador, y no se terminó hasta 1979. Llegado a ese punto, el casco fue secado poco a poco.

Un curioso problema de conservación lo representaban las seis velas que sobrevivieron de las 10 originales del *Vasa*. Se recuperaron donde se guardaba el velamen de repuesto, en un pañol del sollado. Su tejido estaba en tan malas condiciones que el mero manipulado podría hacer que se pulverizase. En cambio, sí podíamos trabajarlas sin sacarlas del agua. Se prepararon, pues, unos grandes baños en los que los restos de las velas pudieron ser desplegados, limpiados y secados con alcohol y xileno. A causa de su fragilidad se las fijó a un bastidor de fibra de vidrio mediante una solución plástica preparada al







5. LOS OBJETOS PEQUEÑOS son los que nos dan tal vez más idea de lo que era la vida a bordo del *Vasa*. La brillantez de coloridos del bajel se evidencia en el emblema heráldico. La bien atada gavilla que resalta en el centro del blasón representa la palabra *Vasa*, apellido de la dinastía reinante entonces en Suecia (*aquí encima en el extremo izquierdo*). En los otros cuadros podemos ver (*empezando por el superior izquierdo y siguiendo las agujas del reloj*): ropas, pertenencias de algún tripulante, servicio de mesa de un oficial, material de botica, equipo para reparar el velamen, munición, juegos, monedas y objetos de aseo.

efecto. La solución, por tener el mismo índice de refracción que las fibras de vidrio, las hace invisibles.

El hierro forjado lo había destruido la herrumbre hacía ya mucho tiempo, a excepción del macho inferior y la muñonera del timón (el fleje y el gozne sobre los que el timón había girado), los cuales, por haber quedado más hundidos en la arcilla del fondo marino, se conservaron en bastante buen estado. Encontramos también un perno oculto cuando, en 1992, nos disponíamos a replantar los mástiles.

Al hierro fundido de las balas de cañón lo protegió su bajo contenido de carbono, que le permitió resistir la oxidación. Como estas balas llenas de orín se estropearían si se las exponía al aire, las secamos en hidrógeno a 1060 ºC., restaurando con ello el hierro a la vez que las purgábamos de componentes dañinos.

Había que recomponer el barco. Para nuestra fortuna, el *Vasa* fue construido con un doble sistema de pernos de hierro y cuñas de madera, por lo que la desaparición de los pernos no provocó la desarticulación de la estructura. De ahí que la parte principal del casco pudiera sacarse toda de una pieza a la superficie. Pero se había destrozado el castillo de popa y se habían desprendido el espolón de proa y otras piezas; ello exigió identificar y colocar adecuadamente miles de elementos estructurales, desde vigas pesadas hasta astillas finísimas: un rompecabezas colosal que era preciso resolver sin la ayuda de modelo alguno.

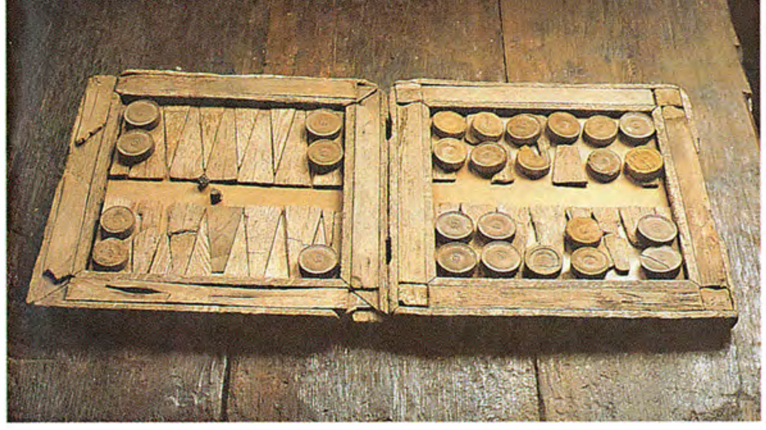
Los restauradores dudaron si sería conveniente rellenar las lagunas del registro arqueológico. Al principio no les costó mucho eludir la cuestión, siendo como eran tan abundantes los restos originales. Pero pronto llegaron a una fase en la que, para aprovechar piezas supervivientes, había que fabricar otras nuevas de conexión. La simetría ayudó muchísimo: un barco tiene iguales los dos costados; cuando faltaba algún fragmento, lo torneábamos tomando como modelo su equivalente del otro lado.

El *Vasa* nos ha revelado muchos aspectos inesperados de la carpintería de ribera. El sistema del gobernalle, por ejemplo, es de manejo engorroso. La caña se prolonga nada menos que 11 metros desde la parte superior del timón hasta el ojo de la palanca de mando —una barra vertical que conectaba en ángulo recto con la caña y subía hasta la cubierta a través de un soporte con engranaje giratorio—. Para gobernar la nave, el timonel debía alzar primero la palanca y bajarla después apretándola con todas sus fuerzas contra el soporte. La acción combinada movería la caña hacia un lado. Para centrar el timón, había que tirar de la palanca hacia atrás hasta fijarla en la muesca del soporte.

Por lo que parece, el constructor estaba siguiendo una tradición que sólo había tenido sentido cuando los barcos eran más pequeños. En el *Vasa,* la gran longitud de la caña limitaba el ángulo de giro del timón a 14 grados, siete hacia la izquierda y siete hacia la derecha. Esta escasa apertura del ángulo de giro, junto con la relativa pequeñez de la superficie del timón, significaba que la mayor parte del gobierno del buque tenía que hacerse manipulando las velas.

Lo más sorprendente del *Vasa* es su espléndida ornamentación. Nos hallamos ante un buque de guerra adornado por todas partes con esculturas tan resaltadas que podían atraer las miradas durante un combate. Respondía esto a varios propósitos: dar ánimos a los amigos, intimidar a los enemigos, hacer valer derechos e im-





presionar al mundo con tal manifestación de poderío y de gloria.

La decoración del castillo de popa, por ejemplo, refería la historia de los *Vasa*, la familia real sueca. La ornamentación comienza en lo más alto con una talla que representa al joven rey Gustavo Adolfo entre dos grifos que sostienen sobre su cabeza la corona. Esto supone toda una afirmación política, pues iba contra las pretensiones del primo carnal de Gustavo Adolfo, el rey de Polonia Segismundo III, quien reclamaba también la corona sueca. La afirmación es reforzada por lo que se lee en el friso subyacente: "G A R S", o sea, las iniciales de *Gustavus Adolphus Rex Sueciae*. Viene, a continuación, el escudo de armas nacional de Suecia, y, bajo él, el blasón de la dinastía Vasa. El término "*Vasa*" significaba, en el idioma sueco antiguo, "gavilla", y por eso hay representada una en el centro mismo del escudo.

En las esculturas, tanto tiempo sumergidas, apenas quedaban vestigios de color; su madera había adquirido un tono pardo oscuro. Examinándola más de cerca se veían aún, acá y allá, brillantes motitas de pan de oro, lo que nos hizo pensar que muchos de los relieves y esculturas habían sido dorados. Respecto a los demás colores, nos asaltaba un montón de dudas, pero desde 1961 se han desarrollado diversas técnicas aplicadas a discernir los colores, entre las que descuella la combinación de un microscopio electrónico con un analizador de rayos X dispersante de energía. El *Vasa* brillaría con su colorido y refulgiría con su oro como el retablo mayor de una iglesia barroca. Hasta la fecha nos hemos valido de esta información para restaurar algunas esculturas, entre ellas el blasón familiar de los Vasa.

La vida a bordo debía de ser dura incluso por aquellos años, en los que se trababan pocas batallas navales. Pero también la paz tenía sus horrores: en un espacio muy reducido habrían de convivir hacinados más de 400 hombres. Las condiciones higiénicas eran pésimas, y la comida, deficiente ya en el puerto, cuánto peor no sería después de haber pasado varias semanas dentro de la bodega de un barco. Marinería y oficiales se hallaban expuestos a contraer numerosas enfermedades.

Un barco hundido es una especie de cápsula del tiempo. A decir verdad, resulta preferible a los artefactos de la piedra angular o la cámara funeraria, porque nos proporciona una instantánea auténtica, espontánea, de la vida cotidiana del pretérito. Los buques, su equipo y su cargamento contienen tesoros de información sobre la técnica y el comercio, las guerras y la diplomacia, las gentes y el espíritu de la época.

Ni la tripulación ni el equipamiento del *Vasa* habían sido aún completados cuando el bajel se hundió. Faltábanle, por ejemplo, 300 marinos de la normal dotación militar. Sin embargo, fueron recuperados miles de pertenencias personales. Las de la marinería eran en su mayor parte objetos de madera o de arcilla. Los cuartos de los oficiales, en el castillo de popa, contenían fina cristalería sueca, porcelanas, servicios de mesa de estaño y de latón, y otros bienes importados de diversos países de Europa. Un frasco de peltre contenía aún alcohol puro, de 66 grados, que parece ser arac procedente de las Indias Orientales. Puedo atestiguar, por propia experiencia, que el licor estaba bueno.

En junio de 1990, el rey Carlos Gustavo XVI inauguró el Museo Vasa de Estocolmo. Allí descansa el regio navío, rodeado de los objetos del que fue su mundo, cual perenne testimonio de otros tiempos y otros lugares.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE POWER AND THE GLORY: THE SCULPTURES OF THE WARSHIP WASA. Hans Soop. Almqvist and Wiksell/Coronet Books, 1986.

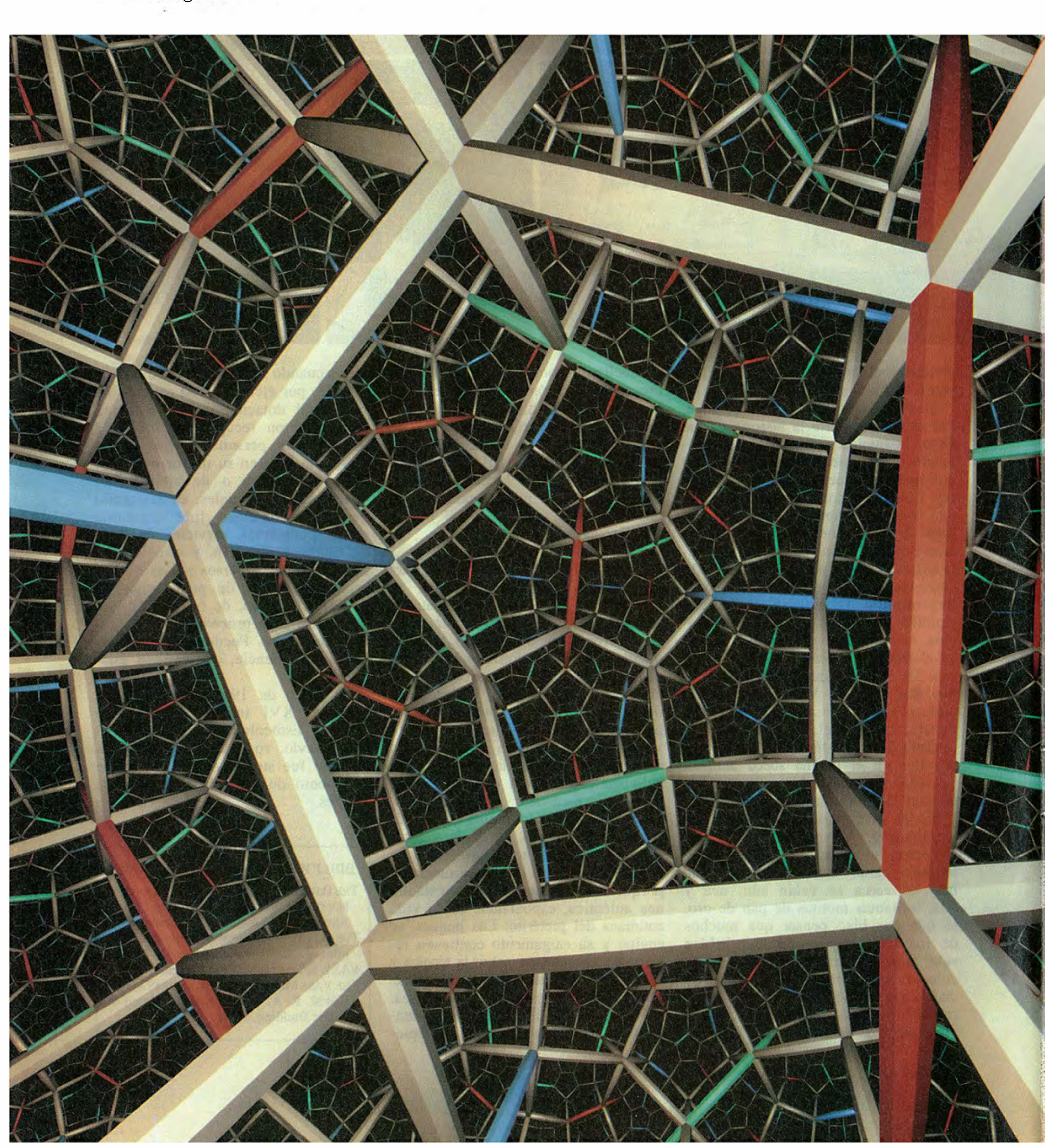
THE ROYAL WARSHIP WASA. Björn Landström. Stenström Interpublishing, 1988.

VASA. Erling Matz. Vasa Museum, 1990.

THE VASA MUSEUM: AN OLD SHIP IN A NEW HOUSE. K. A. Adrup. National Board of Public Building, 1990.

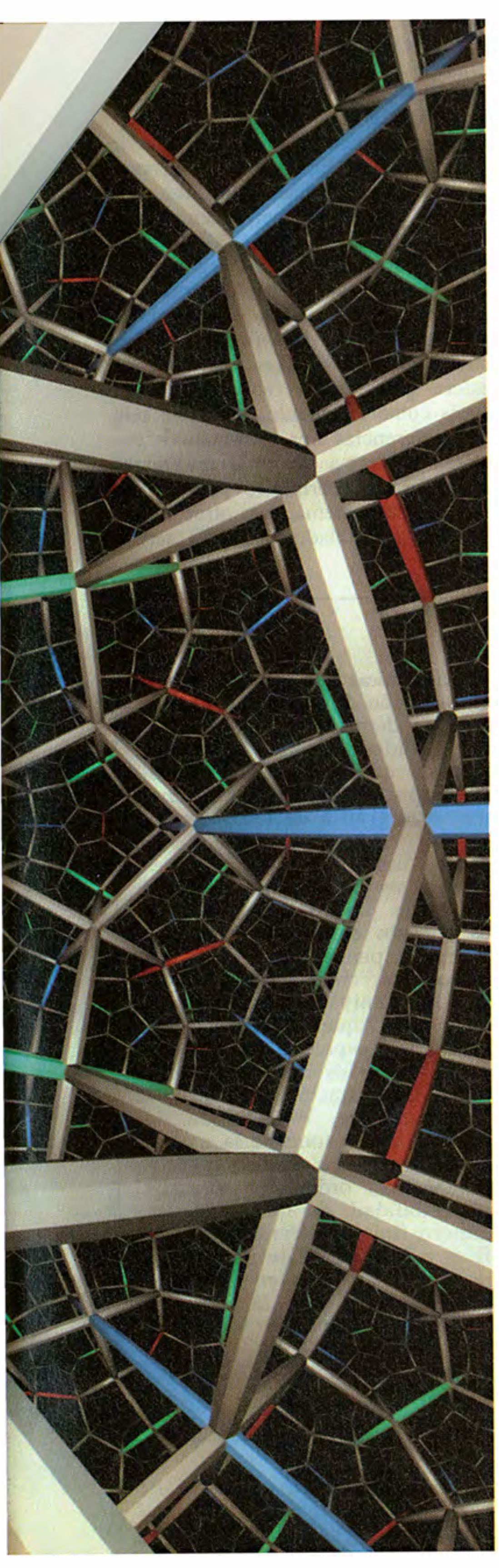
LA MUERTE DE LA DEMOS

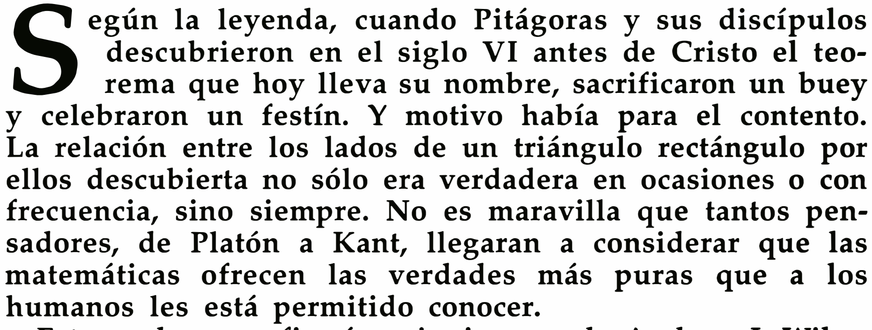
John Horgan



TRACION

Los ordenadores están transformando las vías para el descubrimiento, la demostración y la comunicación de ideas matemáticas.

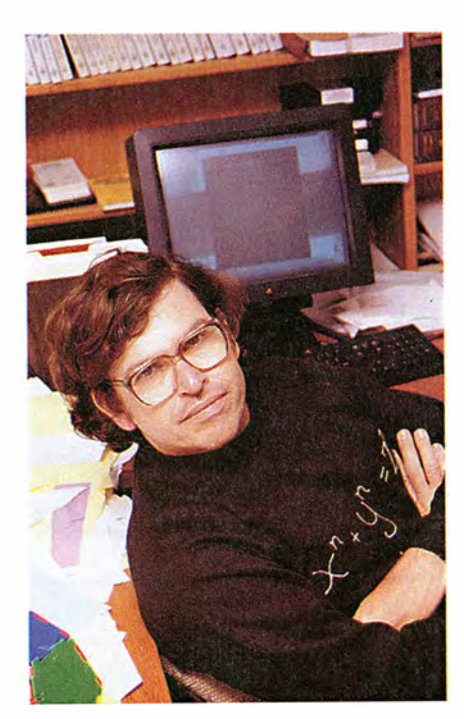




Según la leyenda, cuando Pitágoras y sus discípulos descubrieron en el siglo VI antes de Cristo el teorema que hoy lleva su nombre, sacrificaron un buey y celebraron un festín. Y motivo había para el contento. La relación entre los lados de un triángulo rectángulo por ellos descubierta no sólo era verdadera en ocasiones o con frecuencia, sino siempre. No es maravilla que tantos pensadores, de Platón a Kant, llegaran a considerar que las matemáticas ofrecen las verdades más puras que a los humanos les está permitido conocer.

Este credo se reafirmó en junio, cuando Andrew J. Wiles, de la Universidad de Princeton, reveló en una reunión de matemáticos celebrada en la Universidad de Cambridge que había demostrado el último teorema de Fermat, uno de los problemas más célebres que fue planteado hace más de 350 años y cuyas raíces profundizan hasta el mismísimo Pitágoras. Los matemáticos llevan milenios midiendo los avances de su ciencia por los teoremas que han sido demostrados, consistiendo las demostraciones en cadenas de razonamientos lógicos conducentes desde un sistema de axiomas hasta alguna conclusión irrefutable. Pero las matemáticas han acabado infectadas por las mismas dudas que acongojan al pensamiento moderno. Los matemáticos pueden verse obligados a aceptar lo que muchos científicos y filósofos han admitido ya, a saber: que sus asertos sólo son, en el mejor de los casos, provisionalmente verdaderos o, si se quiere, verdaderos mientras no se demuestre que son falsos.

Esta incertidumbre es fruto, en parte, de la creciente complejidad de las matemáticas. Las demostraciones son,



1. ESTA "VIDEODEMOSTRACION" imparte un impresionante realismo a un teorema demostrado por William P. Thurston (a la izquierda), del Instituto de Investigación en Ciencias Matemáticas. El teorema establece una profunda conexión entre la topología y la geometría, y muestra la forma en que el espacio que rodea a un nudo complejo (representado en esta escena por la estructura reticular) da lugar a una geometría "hiperbólica", en la cual las líneas paralelas son divergentes y los lados de los pentágonos forman ángulos rectos. El vídeo, generado por ordenador, se titula Not Knot. Fue producido en el Centro de Geometría de Minnesota.

con frecuencia, tan largas y complicadas que resulta difícil evaluarlas.

Otro elemento catalizador del cambio ha sido el ordenador, que está obligando a los matemáticos a reconsiderar la naturaleza misma de la demostración y, por consiguiente, de la verdad. Ciertas demostraciones de años recientes han exigido cómputos enormes realizados por ordenadores. Ningún humano —mero mortal— puede comprobar las denominadas "demostraciones computarizadas"; sólo otros ordenadores pueden hacerlo. Los investigadores han propuesto una demostración computacional que ofrece sólo la probabilidad (no la garantía) de que un enunciado sea verdadero, propuesta que no pocos matemáticos consideran puro camelo.

Al mismo tiempo, hay matemáticos que están poniendo en tela de juicio la idea de que el paradigma y epítome de la verdad han de ser las demostraciones formalizadas. Nadie aboga por la supresión de las demostraciones, pero algunos consideran que la validez de ciertas proposiciones puede quedar mejor establecida comparándola con experimentos realizados en ordenadores o con fenómenos del mundo real. "En los próximos 50 años la importancia de las demostraciones en matemáticas va a disminuir", opina Keith Devlin. Poderosas fuerzas institucionales están promoviendo estas herejías. La estadounidense Fundación Nacional para la Ciencia lleva años instando a los matemáticos a implicarse más en las ciencias de la computación y en otros campos con posibles aplicaciones. Phillip A. Griffiths y Michael Atiyah, ganador en 1966 de la Medalla Fields (tenida en matemáticas por equivalente al premio Nobel), han acicateado a los matemáticos para que se aventuren extramuros de sus torres de marfil y se mezclen con el mundo real.

Hay grupos de resistentes. Uno de los más explícitos paladines de la tradición es Steven G. Krantz, quien ha instado a los estudiantes a preferir las matemáticas a la informática, la cual, previene, podría ser moda pasajera.

David Mumford, también Medalla Fields en 1974 por investigaciones en matemática pura, que se dedica ahora al estudio de la visión artificial, acaba de escribir que "a pesar de todas las exageraciones propagandísticas, de lo que diga la prensa, de la presión de las instituciones patrocinadoras, etcétera, la comunidad de la matemática pura sigue considerando a los ordenadores como invasores, profanadores del campo sagrado." Mumford propuso el año pasado un curso en el que los instructores habrían de mostrar a los alumnos cómo programar un ordenador para resolver problemas de cálculo diferencial e integral. "Me fue vetado", recuerda, "pero no por las razones que yo esperaba —protestas de los alumnos— sino porque la mitad de mis colegas docentes no sabían programar."

Una situación que está cambiando rápidamente, si es que el Centro de Geometría de Minnesota puede servir de indicación. El Centro de Geometría fue fundado hace dos años. Entre los miembros permanentes del centro, se cuentan algunos de los más distinguidos matemáticos del mundo. Allí, un día cualquiera, un grupo de jóvenes de la plantilla monta un vídeo que muestra la forma en que se puede aplastar, retorcer y estirar una esfera para acabar volviéndola del revés como un guante, y en una sala de conferencias tres informáticos explican la forma de crear programas de grafismo informático para la enseñanza de matemáticas; otros investigadores, instalados frente a termi-

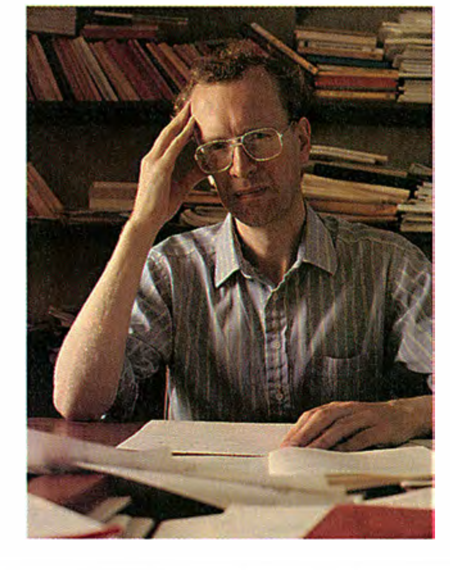
¿Un espléndido anacronismo?

Quienes consideran que las matemáticas experimentales y las demostraciones computarizadas tienen más de abominación que de innovación poseen especiales motivos para gozarse con la conquista del último teorema de Fermat, hazaña de Andrew J. Wiles. La proeza de Wiles ha sido un triunfo de la tradición y va en dirección contraria a todas las corrientes modernas en matemáticas.

Wiles es fiel creyente en las matemáticas por las matemáticas. "Desde luego, no quisiera verlas reducidas a mera sirvienta de las aplicaciones, lo que no va siquiera en interés de las aplicaciones mismas", manifiesta.

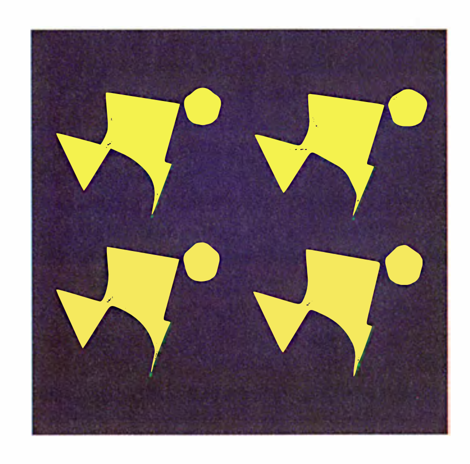
El problema por él resuelto fue planteado hace más de 350 años por el sabio francés Pierre de Fermat. Constituye un precioso y magnífico ejemplo de problema puramente matemático. Fermat afirmaba haber descubierto una demostración para la proposición siguiente: La ecuación $X^N + Y^N = Z^N$ no tiene soluciones enteras para ningún valor entero de N que sea mayor que 2.

Los esfuerzos de los matemáticos por hallar tal demostración (que Fermat jamás reveló) contribuyeron a establecer los fundamentos de la moderna teoría de números, rama de las matemáticas que estudia los números enteros. La demostración de Wiles posee esencialmente la misma forma deductiva y clásica que tenían los teoremas de Euclides. No entraña computación alguna y afirma ser no probable, sino absolutamente verdadera. Tampoco utilizó Wiles ordenadores para la representación gráfica de ideas o para realizar cálculo alguno.



Wiles concede que los tanteos con ordenadores pueden ser útiles para verificar conjeturas. En los años setenta, los ensayos con ordenadores indujeron a pensar que una osada proposición, conocida por conjetura de Taniyama, pudiera ser verdadera. Aquellos ensayos sirvieron para espolear trabajos que establecieron los cimientos de la propia demostración de Wiles.

Sin embargo, Wiles duda de que él llegue a tomarse la molestia de aprender a realizar investigaciones por ordenador. Rechaza la posibilidad de que haya un número finito de verdades accesibles a las formas de indagación tradicionales. "Estoy en vehemente desacuerdo con la idea de que se están agotando los teoremas importantes. Pienso que no hemos arañado apenas la superficie."





2. JEAN E. TAYLOR, matemática experimentalista, busca los principios de las superficies minimales en el estudio de fenómenos reales como las pompas de agua jabonosa y en otros generados por ordenador, como los cristales idealizados (*izquierda*).

nales NeXT color negro mate reflexionan sobre imágenes vivamente coloreadas de "hipercubos" cuatridimensionales, remolinos fractales y estructuras reticulares que se sumían hacia el infinito.

En una de las terminales tenemos a David Ben-Zvi, estudiante de matemáticas en Princeton. David está pasando seis meses en el Centro, dedicado a la exploración de sistemas dinámicos no lineales. Rechaza los temores expresados por algunos matemáticos de que los ordenadores puedan apartarles de los métodos que tan bien y tan largamente les han servido.

El Centro de Geometría es un vivero de la matemática experimental, en la cual los investigadores verifican sus ideas representándolas gráficamente y efectuando cálculos con ordenadores. El año pasado, algunos de los profesores del centro contribuyeron a fundar una revista, *Experimental Mathematics*, que sirviera de escaparate a esos trabajos. "Los métodos experimentales no son cosa nueva en matemáticas", señala el director de la revista, David B. A. Epstein, recordando que Carl Friedrich Gauss y otros gigantes solían realizar cálculos experimentales antes de construir demostraciones formales.

Burbujas y tortellini

Jean E. Taylor ha pasado dos decenios investigando superficies minimales: superficies que representan el área o volumen mínimo posible que una curva o superficie dadas limitan. Es posible que las superficies minimales más elegantes y simples que se encuentran en la naturaleza sean las burbujas y películas jabonosas. Taylor ha tenido siempre inclinaciones experimentales. Ya en los primeros pasos de su carrera solía verificar los modelos de superficies minimales que ella misma había calculado hundiendo bucles de alambre en una cubeta llena de agua jabonosa. En la actualidad es más probable que modelice sus burbujas con un programa de gráficos computarizados. También ha ascendido de categoría, pasando de las burbujas jabonosas a los cristales, cuyas superficies minimales se atienen a reglas más complicadas. En colaboración con Frederick J. Almgren, Robert F. Almgren y Andrew R. Roosen está tratando de remedar en un ordenador el crecimiento de los copos de nieve y de otros cristales.

Otro matemático que ha estado merodeando por el ciberespacio a la caza de nuevas superficies minimales es David A. Hoffman, Entre sus presas favoritas están las catenoides y los helicoides, objetos que nos recuerdan los tortellini y que fueron descubiertos en el siglo XVIII. En 1992, Hoffman, Fusheng Wei y Hermann Karcher conjeturaron la existencia de una nueva clase de helicoides, los helicoides con asas. Lograron representar con éxito estos helicoides —los primeros descubiertos desde el siglo XVIII— en un ordenador, y procedieron a elaborar una demostración formal de su existencia.

A lo largo de los últimos diez años, la especialidad que se ha llevado la parte del león en matemáticas experimentales es la "dinámica no lineal", o caos. En general, los sistemas no lineales están gobernados por sistemas de reglas sencillas que dan pie a fenómenos complicados por realimentación y efectos similares. Los autómatas celulares, que van dividiendo la pantalla del ordenador en un conjunto de celdillas (equivalentes a píxeles) ilustran los principios de la no-linealidad. En general, el color o "estado" de cada célula está determinado por los estados de sus vecinas. La alteración del estado de una sola casilla puede ser suficiente para provocar una cascada de cambios por todo el sistema.

Uno de los autómatas celulares más famosos es el inventado a comienzos de los años setenta por John H. Conway, quien ha demostrado que su autómata, al que llama "Vida", es "indecidible": no se puede establecer si sus pautas y configuraciones serán infinitamente variadas o si acabarán por repetirse.

Todavía más famoso es el conjunto de Mandelbrot, cuya imagen se ha tornado en emblema de la especialidad del caos desde que fue popularizado por Benoit B. Mandelbrot. El conjunto es generado mediante una fórmula sencilla que contiene un término complejo (basado en la raíz cuadrada de un número negativo). La fórmula va lanzando soluciones, que son luego iteradas, es decir, reintroducidas en la fórmula para generar nuevas soluciones.

Las matemáticas en que se funda este conjunto habían sido inventadas hacía más de 70 años por Gaston

Julia y Pierre Fatou, pero han sido los ordenadores los que han puesto a la vista de todos el barroquismo de su belleza. Representado en un ordenador, el conjunto de Mandelbrot se condensa en una imagen. La figura es un fractal: sus contornos imprecisos tienen longitud infinita y los motivos que exhibe se repiten recurrentemente a diferentes escalas.

Los investigadores estudian ahora conjuntos similares al de Mandelbrot, pero que moran en cuatro dimensiones. John Milnor intenta calar en las propiedades del conjunto cuatridimensional mediante el examen de rebanadas bidimensionales del mismo, generadas por ordenador.

La popularidad de las matemáticas basadas en el grafismo informático ha provocado reacciones contrarias.

Arthur Jaffe y Frank S. Quinn sostienen que, para establecer la verdad, los experimentos con ordenadores y la concordancia con fenómenos naturales no pueden reemplazar a las demostraciones. "Los resultados han sido discutibles y, en ocasiones, desastrosos." La mayoría de los matemáticos que se valen del grafismo informático y de otras técnicas experimentales conceden que ver no es creer y que sigue siendo necesaria la demostración formal de las conjeturas a las que han llegado por medio de la computación. Hoffman ofrece una defensa vigorosa de las demostraciones tradicionales.

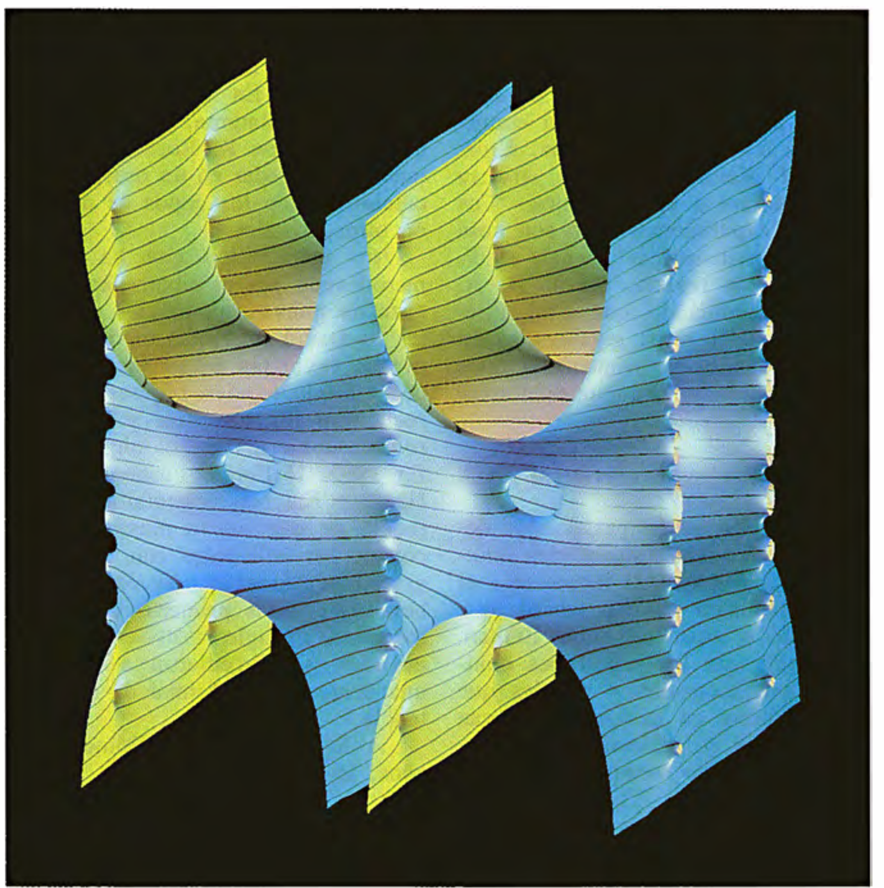
Los entusiastas del ordenador más veteranos saben que los experimentos computacionales pueden resultar engañosos, sean numéricos o gráficos. La hipótesis de Riemann, una famosa predicción sobre las regularidades que muestran los números primos en su desfile hacia el infinito, sirve de cuento y moraleja. La hipótesis, enunciada hace más de cien años, está considerada como uno de los problemas pendientes más importantes de las matemáticas.

Franz Mertens, contemporáneo de Riemann, propuso una conjetura relacionada con aquélla, concerniente a números enteros positivos; la verdad de la conjetura de Mertens sería un fuerte indicio de la verdad de la hipótesis de Riemann. Hace unos diez años se había comprobado mediante ordenadores que la propuesta de Mertens era efectivamente cierta para los primeros diez mil millones de enteros. Sin embargo, cómputos de mayor alcance revelaron en 1984 que la pauta predicha por Mertens acaba por desaparecer para valores del orden de $10^{(10^{70})}$.

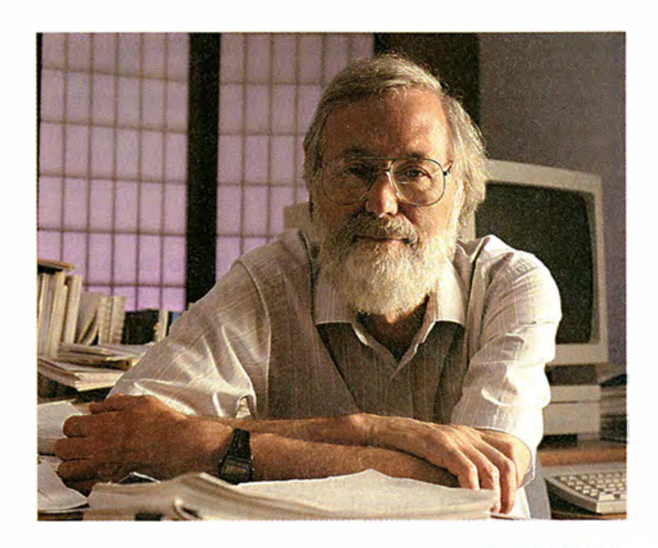
Un posible inconveniente de los ordenadores es que todos sus cálculos se basan en la manipulación de números enteros, o sea, de elementos discretos que son, en el fondo, ceros y unos. Los ordenadores solamente pueden manejar aproximaciones de los números reales, como el número *pi* o la raíz cuadrada de 2. Quienes conocen bien las funciones de redondeo de una calculadora de mano pueden inducirlas fácilmente a dar resultados incorrectos. Los errores debidos a programas más complejos y refinados pueden ser más complicados y escurridizos. En 1991, David R. Stoutemyer presentó 18 experi-

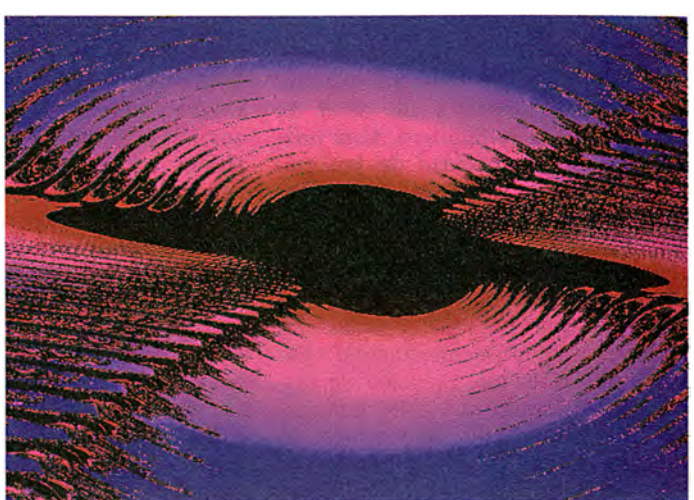


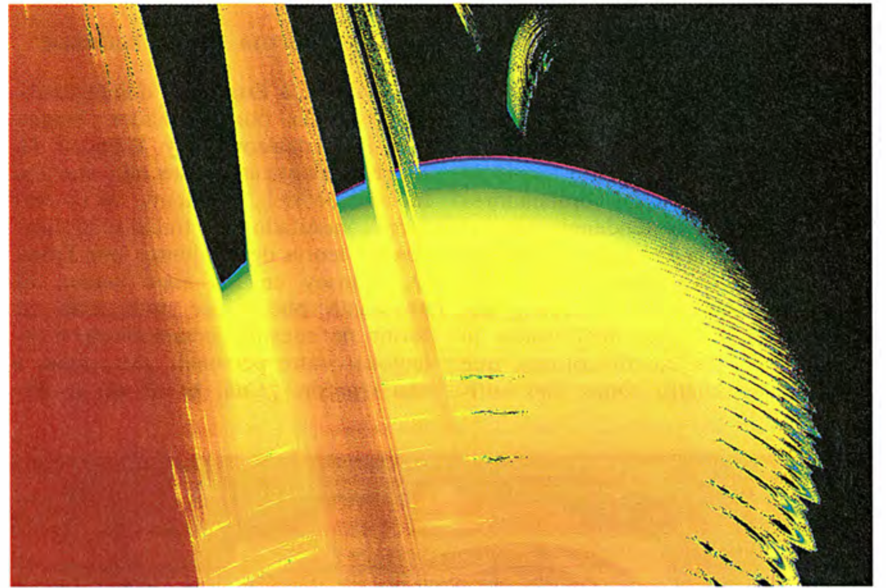




3. HELICOIDE CON UN AGUJERO (*abajo, a la izquierda*), descubierto por David A. Hoffman y colaboradores, de la Universidad de Massachusetts en Amherst, con ayuda de sistemas de grafismo informático. Edward D. Thayer, alumno de Hoffman, ha descubierto una estructura (*abajo*) que remeda la configuración de ciertos polímeros.







4. PAISAJES ULTRAMUNDANOS generados por un ordenador al "rebanar" un mapa cuadridimensional similar al célebre conjunto de Mandelbrot. John Milnor, de la Universidad de Nueva York en Stony Brook, estudia imágenes bidimensionales parecidas con el propósito de comprender las propiedades de este complejo objeto matemático.

mentos de cálculo algebraico que daban resultados incorrectos al ser realizados con los programas matemáticos al uso.

Stephen Smale ha buscado fundar la computación matemática sobre bases más seguras. Junto con Lenore Blum y Michael Shub ha creado un modelo teórico de ordenador capaz de procesar no sólo enteros, sino también números reales. Blum y Smale llegaron a la conclusión de que el conjunto de Mandelbrot es incomputable, en un sentido técnico del término; es decir, no es posible establecer con certeza si un determinado punto del plano complejo reside dentro o fuera del hirsuto contorno del conjunto. Estos resultados sugieren que "hay que ir con cuidado" en las extrapolaciones basadas en resultados de experimentos con ordenador, advierte Smale.

Stephen Wolfram, creador de *Mathematica*, el más difundido de los programas matemáticos, reconoce que "efectivamente, hay fallos en las matemáticas experimentales. Lo mismo que todas las demás clases de experimentos, se pueden realizar mal." Pero hace hincapié en que los experimentos computacionales pueden proporcionar más resultados que el método de conjetura y demostración formal a la vieja usanza.

Aunque comparte la fascinación de Wolfram por los autómatas celulares, Conway sostiene que la carrera de Wolfram, así como su desdén por las demostraciones, hace ver que no es un matemático de raza. "Los matemáticos puros no suelen fundar empresas ni afrontar el mundo de forma agresiva", manifiesta el creador de Vida.

Los puristas pueden tenerlo "más crudo" para dejar de lado las opiniones de William P. Thurston, que es también entusiasta promotor de las matemáticas experimentales y de la utilización de ordenadores en las matemáticas. A mediados del decenio de 1970 señaló una profunda conexión entre dos ramas matemáticas hasta entonces separadas, la topología y la geometría. Este trabajo le mereció la Medalla Fields de 1982.

Thurston recalca su convicción de que las verdaderas matemáticas son descubiertas y no inventadas. Pero sobre la cuestión de las demostraciones más podríamos tenerle por discípulo de Thomas S. Kuhn que de Platón. Kuhn es el filósofo que en 1962 sostenía en su libro *La estructura de las revoluciones científicas* que las teorías científicas son aceptadas no porque sean "verdaderas" en un sentido objetivo, sino por razones sociales.

Hace más de sesenta años, Kurt Gödel demostró con su teorema de incompletitud que "es imposible codificar las matemáticas", señala Thurston. Cualquier sistema de axiomas genera enunciados cuya verdad es evidente por sí misma y que no pueden ser demostrados a partir de dichos axiomas. Y ya antes, Bertrand Russell había señalado que la teoría de conjuntos, base de casi todas las matemáticas, padece contradicciones lógicas relacionadas con el problema de la autoalusión. (El enunciado autocontradictorio "Este enunciado es falso" sirve de ilustración al problema.) "La teoría de conjuntos se funda en mentiras corteses, en cosas sobre las que estamos de acuerdo aunque sabemos que no son verdaderas", dice Thurston. "En cierto sentido, la fundamentación de las matemáticas tiene un aire de irrealidad."

Opina que las demostraciones altamente formalizadas tienen mayores probabilidades de contener errores que las que apelan a un nivel de comprensión más intuitivo. Está enamorado de la capacidad de los gráficos informáticos para comunicar conceptos matemáticos abstractos a otras personas, tanto pertenecientes a la comunidad profesional como ajenas a ella. Hace dos años, el Centro de Geometría produjo a instancias suyas una "vídeodemostración" llamada Not Knot que presenta de forma impresionante una conjetura demostrada por él diez años antes. El vídeo trata del comportamiento de los objetos matemáticos denominados variedades tridimensionales en un espacio "hiperbólico" no euclídeo. El Centro de Geometría está produciendo ahora un vídeo de otro de sus teoremas, que muestra de qué forma se puede volver una esfera del revés, como si fuera un guante [*véase la ilustración de la portada*].

Paradójicamente, los ordenadores han catalizado una tendencia contraria, en la cual la verdad se consigue a expensas de la inteligibilidad. En 1976 Kenneth Appel y Wolfgang Haken afirmaron haber demostrado la conjetura de los cuatro colores, que enuncia que cuatro tonos son suficientes para colorear un mapa plano, infinitamente grande si se quiere, de forma que ningún par de países con frontera común sean de un mismo color. La demostración de Appel y Haken era en ciertos aspectos convencional, es decir, consistía en una serie de pasos lógicos y analizables uno por uno, que llevaban hasta la conclusión. La conclusión era que la conjetura podría quedar reducida a una predicción concerniente al comportamiento de unos 2000 mapas diferentes. Unas 1000 horas de tiempo de cómputo más tarde, la máquina concluyó que los dos mil mapas se comportaban en la forma prevista: la conjetura de los cuatro colores era verdadera.

El problema de la reunión

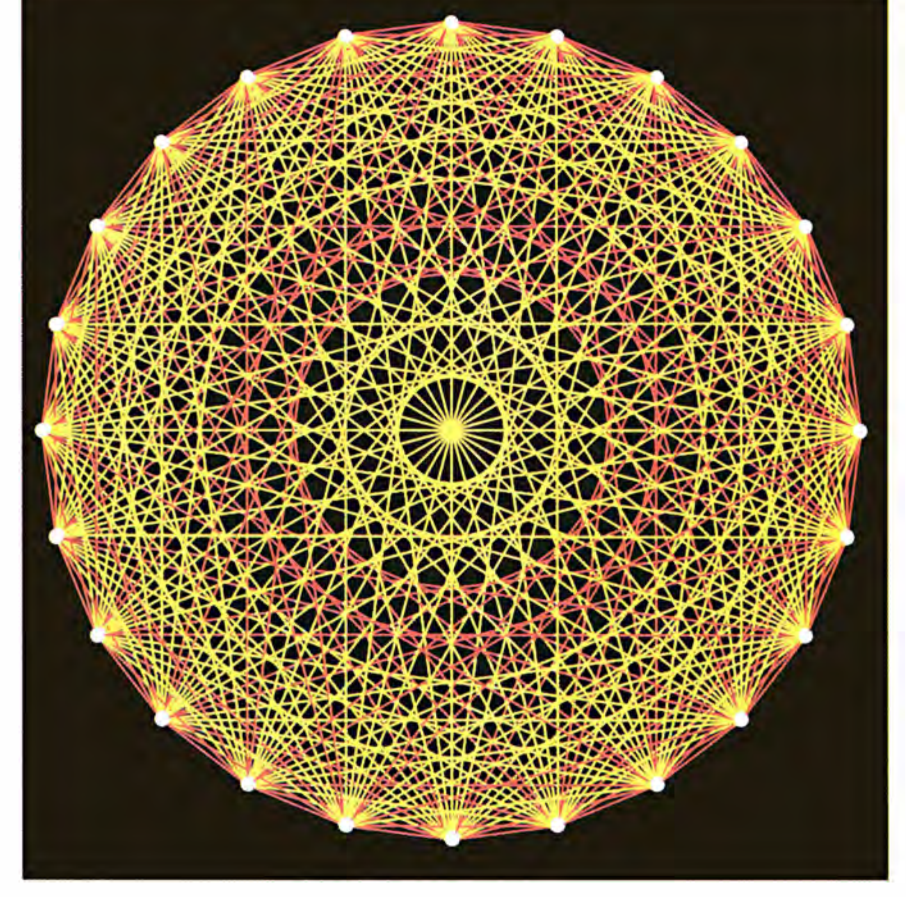
Siguieron a ésta otras demostraciones asistidas por ordenador. Stanislaw P. Radziszowski y Brendan D. MacKay publicaron este año una demostración del "problema de la reunión", suscitado por trabajos realizados en teoría de conjuntos por Frank D. Ramsey en los años veinte. El problema puede ser enunciado en forma de cuestión concerniente a relaciones entre personas que asisten a una reunión. ¿Cuál ha de ser el número mínimo de asistentes para que esté garantizado que haya al menos X personas que se conocen mutuamente, o al menos Y personas que no se conozcan de nada? Los números así definidos son llamados números de Ramsey.

Demostraciones anteriores habían establecido que el número de asistentes ha de ser 18 para asegurar que al menos hay cuatro personas que se conocen entre sí, o al menos 4 que no se conocen. Radziszowski y McKay demostraron que el número de Ramsey correspondiente a cuatro amigos o cinco desconocidos es 25. Su demostración, estiman, consumió el equivalente de 11 años de cómputo en un ordenador normal.

Ciertos matemáticos oponen objeciones a las demostraciones asistidas por ordenador. "No creo en las demostraciones realizadas por ordenador", manifiesta Pierre Deligne, especialista en geometría algebraica y Medalla Fields en 1978. "Yo creo en una demostración si la entiendo, si es clara." Aunque reconoce que los humanos pueden cometer errores, añade: "Los ordenadores también cometen errores, sólo que mucho más difíciles de descubrir."

No faltan quienes adopten un punto de vista más funcional, y argumentan que el establecimiento de la verdad es más importante que el goce estético de los matemáticos. Los defensores de esta metodología señalan que las demostraciones convencionales distan mucho de estar libres de error. A principios de siglo, la mayoría de los teoremas eran bastante breves, podían ser estudiados en una sesión y estaban producidos por un solo autor. En la actualidad, las demostraciones suelen prolongarse cientos de páginas o más, y son tan complicadas que pueden pasar años antes de ser confirmadas por otros.

Entre las demostraciones tradicionales, el récord actual de extensión lo ostenta el teorema de clasificación de grupos finitos simples, cuya demostración quedó terminada a finales del decenio pasado. (Un grupo es un conjunto de elementos, como el de



5. EL PROBLEMA DE LA REUNION fue resuelto por Stanislaw P. Radziszowski y Brendan D. McKay tras un enorme cómputo. Hallaron que se necesitan al menos 25 personas para garantizar que haya al menos cuatro que se conozcan o cinco que sean mutuamente desconocidas entre sí. Este diagrama, en el que las líneas rojas conectan amigos y las líneas amarillas conectan a dos personas que no se conocen, muestra que una reunión de 24 infringe la condición.

Matemáticos de silicio

La incesante penetración de los ordenadores en las matemáticas ha reavivado un antiguo debate: ¿Será posible automatizar completamente las matemáticas? ¿Serán de silicio los grandes matemáticos del siglo venidero?

De hecho, los científicos informáticos han trabajado durante decenios en programas que generen conjeturas y demostraciones matemáticas. A finales de los años cincuenta, Marvin Minski mostró que un ordenador podía "redescubrir" algunos teoremas elementales de la geometría euclídea. En los años setenta, Douglas Lenat, discípulo de Minski, presentó un programa que proporcionaba teoremas geométricos más avanzados. Los escépticos objetaban que los resultados estaban inmersos en el programa original.

Hace diez años, Edward Fredkin trató de relanzar el decaído interés por las matemáticas automáticas creando el que dio en ser llamado premio Leibniz, que ofrece cien mil dólares al primer programa de ordenador que logre idear un teorema que ejerza un "efecto profundo" en las matemáticas.

Algunos profesionales del llamado "razonamiento automatizado" creen estar preparados para reclamar el premio. Uno de ellos es Larry Wos, quien afirma haber desarrollado un programa que ha resuelto problemas lógicos y matemáticos que "han tenido perpleja a la gente durante años." Otro aspirante es Siemeon Fajtlowicz, inventor de un programa, llamado Graffiti, que ha propuesto "millares" de conjeturas en teoría de grafos.

Algunos observadores opinan que los ordenadores acabarán superando nuestras facultades matemáticas. Después de todo, hace notar Ronald L. Graham, "no estamos muy bien adaptados para reflexionar sobre el continuo espacio-tiempo o sobre la hipótesis de Riemann. Hemos sido diseñados para recoger bayas o evitar ser devorados."

Otros toman el partido del físico matemático Roger Penrose, quien en su libro *La nueva mente del emperador* afirmaba que los ordenadores jamás podrán reemplazar a los matemáticos. El argumento de Penrose recurría a la teoría cuántica y al teorema de incompletitud de Gödel, pero tal vez haya sido más convincente al explicar su experiencia personal. Las matemáticas, sostiene, son un arte, un acto de creación, que no es posible reducir a la lógica más que puedan serlo el *Rey Lear* o la *Quinta* de Beethoven.

los números enteros, provisto de una operación, la adición, por ejemplo, que combina dos elementos y produce un tercero.) La demostración consiste en unos 500 artículos que suman en total unas 15.000 páginas, y ha sido elaborada por más de un centenar de investigadores.

Otras demostraciones, mucho más cortas, pueden igualmente suscitar la duda. Hace tres años, Wu-Yi Hsiang anunció haber demostrado la antigua conjetura que afirma que, para empaquetar el máximo de esferas en un volumen dado, deben colocarse como las balas de cañón. Hay escépticos convencidos de que la demostración, que ocupa cien páginas, contiene errores; para otros es básicamente correcta.

Pero la clave para lograr mayor seguridad consiste, según algunos informáticos, en aumentar la computarización de las demostraciones, no en disminuirla. Robert S. Boyer ha dirigido una tentativa encaminada a comprimir el corpus cada vez más desparramado de las matemáticas modernas en una sola base de datos, cuya coherencia pueda ser verificada mediante "comprobadores automáticos de demostraciones".

El debate sobre las demostraciones por ordenador ha cobrado mayor intensidad con el advenimiento de una técnica que ofrece no la certeza, sino sólo la probabilidad estadística de que el resultado sea verdadero. Tales demostraciones sacan partido de métodos similares a los utilizados en los códigos de corrección de errores, que garantizan, haciéndolos muy redundantes, que los mensajes transmitidos no se pierdan entre el ruido. Es preciso ante todo formular la demostración en una forma rigurosa de lógica matemática. Las cadenas lógicas sufren después una transformación adicional llamada aritmetización, en la cual las conectivas "y", "o" y otras funciones son traducidas a operaciones aritméticas, como la adición y la multiplicación.

Al igual que un mensaje transformado por un código de corrección de errores, la "respuesta" de una demostración probabilística está distribuida a lo largo de toda su longitud, como lo están los posibles errores. La demostración se verifica "interrogándola" en diferentes puntos y determinando si las respuestas son coherentes; al aumentar el número de consultas, crece en consecuencia la certidumbre de que el argumento sea correcto. Laszlo Babai, que desarrolló las demostraciones hace dos años (conjuntamente con Lance Fortnow, Carsten Lund, Mario Szegedy y Leonid A. Levin), las califica de "transparentes".

El futuro incierto

Tales demostraciones presentan inconvenientes. Szegedy reconoce que la transformación de una demostración tradicional a la versión probabilística es difícil. Una demostración de 1000 líneas podría fácilmente inflarse hasta 1000^3 (1.000.000.000) líneas. No obstante, Szegedy sostiene que, si sus colegas y él logran simplificar el proceso de transformación, las demostraciones podrían convertirse en un método útil para verificar proposiciones matemáticas y cómputos grandes, como los conducentes al teorema de los cuatro colores. Un número relativamente pequeño de verificaciones bastaría para que la probabilidad de error se tornase despreciablemente pequeño: uno dividido por el número de partículas del universo. A esta escala, incluso las demostraciones tradicionales más inmediatas pueden suscitar dudas.

Ronald L. Graham sugiere que la tendencia a alejarse de las demostraciones convencionales, breves y claras, que no dejan ocasión a la duda razonable, puede ser inevitable. "Las cosas que podemos demostrar tal vez sean sólo islitas diminutas, excepciones, comparadas con el vasto océano de resultados que no es posible demostrar con el solo pensamiento humano", explica.

Las matemáticas pueden proporcionar menores goces estéticos al ir los investigadores dependiendo cada vez más de los ordenadores. "Resultaría muy lamentable que en algún momento pudiéramos preguntarle a un ordenador si la hipótesis de Riemann es correcta y éste respondiera, 'Sí, es verdadera, pero jamás podrán ustedes comprender la demostración'."

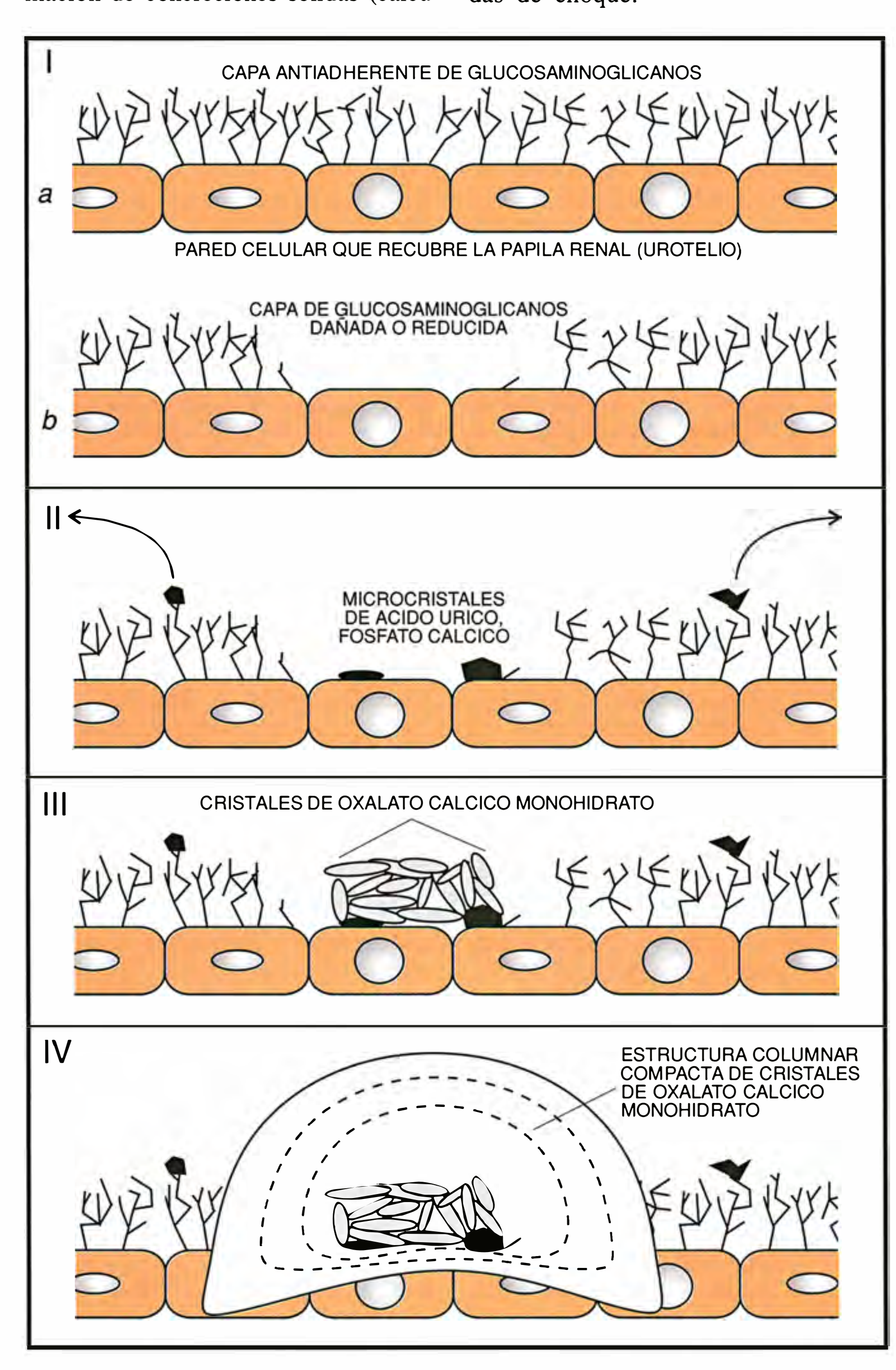
Por el momento, al menos, los tradicionalistas pueden cerrar filas tras héroes como Wiles, el conquistador del último teorema de Fermat, quien rehúye ordenadores, aplicaciones y demás abominaciones. Mas puede que el número de matemáticos como Wiles vaya en descenso.

Ciencia y empresa

Urolitiasis

Cálculos renales de oxalato cálcico monohidrato: una solución.

La urolitiasis afecta a un amplio sector de la humanidad. Así, entre el 5 y 14 % de la población han padecido o padecen esta enfermedad, que consiste en la formación de concreciones sólidas (cálculos renales o piedras de riñón) en el aparato urinario. Cuando el cálculo ya está formado y no se elimina de manera espontánea (cólico nefrítico), en la mayoría de las ocasiones es necesario plantearse su extracción. La intervención quirúrgica clásica ha sido hasta hace pocos años la única opción. El avance técnico ha aportado dos nuevas soluciones: la cirugía endoscópica (ultrasónica o por rayos láser) y el tratamiento mediante ondas de choque.



Esquema de la formación de un cálculo renal de oxalato cálcico monohidrato. El tejido epitelial dañado o mal protegido constituye un factor de riesgo litiásico (I). La vitamina A y el ion Zn(II) favorecen la regeneración de esta capa protectora de glucosaminoglicanos. En una segunda etapa (II), en las zonas con tejido epitelial dañado o mal protegido pueden generarse microcristales de fosfatos cálcicos (pH urinario superior a 6), ácido úrico (pH urinario inferior a 5,5), etcétera, que actúan impulsando la formación sobre ellos del oxalato cálcico monohidrato (nucleación heterogénea). Sin la presencia de estos microcristales, el oxalato cálcico monohidrato jamás se formaría. El fitato actúa impidiendo la formación de estos núcleos heterogéneos. En la tercera etapa (III), el oxalato cálcico monohidrato crece sobre el núcleo heterogéneo, iniciando la formación del cálculo. El fitato detiene este proceso. El Zn(II) potencia la acción del fitato. Por último (IV), en ausencia de una inhibición adecuada se acaba generando el cálculo de oxalato cálcico monohidrato. La alteración que produce en el tejido predispondrá al inicio de la formación de nuevos cálculos

Es bien sabido que todo individuo formador de un cálculo genera, en un 50-70 % de los casos, otro en menos de 5 años. Resulta por tanto evidente que el problema no consiste exclusivamente en la eliminación del cálculo, ya que, con independencia del método utilizado, la alteración causante de la formación de los cálculos sigue sin solucionarse y persiste el riesgo de aparición de otros. Para conocer las causas que lo originan es obligado considerar que éstas dependen del tipo de cálculo generado.

Fundamentalmente pueden considerarse cuatro grandes grupos: cálculos de oxalato cálcico (70 %), cálculos de fosfatos amónico magnésico y cálcico (15-20 %), cálculos de ácido úrico (10-15 %) y cálculos de cistina y otros poco frecuentes (1-2 %). De acuerdo con las investigaciones más recientes, puede establecerse que las causas que impulsan la formación de cualquier cálculo pueden agruparse en dos grandes categorías: factores facilitadores o promotores de la formación de los cálculos y factores inhibidores o frenadores de dicha formación.

Los factores facilitadores o promotores de la formación de los cálculos pueden ser de distinta naturaleza. Algunos son conocidos desde hace años. Así, es sabido que la eliminación urinaria en exceso de ciertas sustancias favorece su precipitación y la consiguiente formación del cálculo. De hecho, éste es un factor fundamental en la aparición de cálculos de ácido úrico, que suele darse en individuos que excretan cantidades importantes del mismo, y además su *p*H urinario es inferior a 5,5, valor por debajo del cual este ácido es insoluble; lo es también en la formación de cálculos de fosfato amónico magnésico o fosfatos cálcicos, en cuyo caso al producirse un *p*H urinario superior a 6 (causado por la presencia de bacterias ureolíticas que generan NH_3) se insolubilizan las sales mencionadas. En los dos ejemplos, debido a la elevada sobresaturación alcanzada, la fase sólida se forma a través de un proceso de nucleación homogénea.

Otros factores promotores son de más reciente descubrimiento. Ocurre así con los nucleantes heterogéneos (factor íntimamente ligado en muchas ocasiones al valor del *p*H urinario). A pesar de que la orina humana está sobresaturada respecto al oxalato cálcico, las concentraciones de tales iones no son suficientes para permitir la nucleación homogénea de esta sal, ni siquiera en pacientes con excreciones superiores a las normales (hipercalciuria, hiperoxaluria); por tanto, la formación de este tipo de cálculos sólo puede justificarse por la presencia de nucleantes heterogéneos que facilitan la formación sobre ellos de los cristales de oxalato cálcico. En este sentido, nuestro grupo ha desarrollado una amplia investigación. Nuestros estudios también han demostrado que un estado deficiente del urotelio que recubre las paredes internas del riñón constituye un importante factor que actúa impulsando la calculogénesis.

Los factores inhibidores son productos contenidos en la orina que todo individuo excreta de forma natural. Actúan impidiendo o retardando, a través de procesos de adsorción, los mecanismos de nucleación (homogénea o heterogénea) y el crecimiento cristalino, o ambos, de las fases sólidas correspondientes. Los más conocidos son el citrato, glucosaminoglicanos y pirofosfato. Si existe una baja actividad de los mismos, la formación del cálculo se ve enormemente potenciada.

En individuos sanos, existe un correcto equilibrio entre los factores promotores y los inhibidores. Una persona productora de cálculos puede padecer una actividad desmesurada de los facilitadores, una actividad deficiente de los inhibidores y, en la mayoría de los casos, ambas cosas a la vez. En este sentido, los estudios efectuados por nuestro grupo han demostrado que el ácido fítico y sus sales, los fitatos, sustancias naturales contenidas en las semillas de algunos vegetales (trigo, avena, soja, pistacho y otros), manifiestan una importante actividad frenadora de la cristalización del oxalato cálcico monohidrato, componente fundamental de un tipo muy frecuente de cálculo. Esta actividad inhibidora del fitato es más de mil veces superior a la que presenta el citrato, por lo que su ingesta en muy pequeñas dosis produce un efecto superior al del citrato, sin modificar el valor del *p*H urinario ni generar problemas de hipertensión.

Los autores nos planteamos la posibilidad de su uso en el tratamiento terapéutico de esta enfermedad, y resultado de la investigación fue la patente de la aplicación terapéutica de este producto para el tratamiento de la litiasis renal oxalocálcica (Patente P9202492) y al desarrollo de un complemento dietético que combina la acción inhibidora del fitato, potenciada por el ion Zn(II) mediante un adecuado control del *p*H urinario, junto con la acción protectora del urotelio, ejercida por la vitamina A. Este complemento dietético, que ha sido introducido en el mercado por el laboratorio Authex de las Islas Baleares con el nombre de LitStop, pretende restablecer el correspondiente equilibrio y con ello disminuir enormemente el riesgo de formar nuevos cálculos. Además, considerando la citada capacidad protectora del uroepitelio que presenta la vitamina A y la acción desincrustante del fitato, este complemento dietético también resulta útil para los pacientes que han sido sometidos a litotricia, cualquiera que sea la composición del cálculo. (*F. Grases, J. G. March y A. Costa-Bauzá, de la Universidad de las Islas Baleares.*)

Transporte marítimo

Capitán informatizado

Un convoy navega a través de las heladas aguas del Atlántico Norte. Pero estos barcos no tienen, a excepción del insignia, tripulación alguna. Todas las funciones de navegación han sido automatizadas. Las señales procedentes del radar, sonar Doppler y sistemas de navegación por satélite se analizan mediante inteligencia artificial y se comparan con mapas y datos digitalizados del rumbo seguido. Todas las correcciones de la derrota las efectúan los propios buques. Si se encuentran con otros barcos en alta mar o en canales estrechos, las maniobras son realizadas automáticamente, y cuando ha pasado el peligro, el convoy vuelve a su rumbo optimizado. Poco tiene que hacer la mínima tripulación del buque insignia. Su presencia es mera concesión a las viejas ordenanzas que requieren la supervisión humana de las funciones críticas.

No hay todavía un convoy así surcando los mares, pero, según Mitshubishi Heavy Industries (MHI), de Tokio, gran parte de la tecnología que podría hacer tal sueño posible está ya disponible.

MHI, uno de los mayores constructores navales del mundo, ha botado un enorme superpetrolero de 258.000 toneladas equipado con buena parte de la tecnología de a bordo que necesitaría un buque sin tripulación. Fue armado en los astilleros de la MHI en Nagasaki para la Shinwa Kaiun Kaisha. Este barco, el primero de una nueva generación de buques controlados y guiados por ordenador, ya ha completado con éxito un viaje a los campos petrolíferos del Oriente Medio con menos de dos docenas de oficiales y marineros a bordo, una dotación muy inferior de la precisa en cualquier nave de ese calado. Los sistemas informatizados toman parte en casi todas las operaciones del buque, desde el mantenimiento de las máquinas y el manejo de la carga a la navegación y la prevención de abordajes.

El centro nervioso del buque, lo que la MHI llama el superpuente, aventaja a cualquier piloto humano: no duerme nunca, y presta a la vez atención a todas las señales procedentes de los instrumentos y sistemas de navegación. El sistema no pierde de vista ni siquiera a su equivalente humano en el puente: le presenta periódicamente, en su pantalla táctil, una señal intermitente que requiere respuesta; si el oficial de guardia está adormecido, o incapacitado, o por algún motivo deja de responder en el tiempo prefijado, el sistema alertará a los oficiales del buque en sus camarotes o dondequiera que se encuentren. Con esto solo, se habría evitado el desastre del *Exxon Valdez*, pero el superpuente hace mucho más.

A partir de datos cartográficos digitalizados del rumbo elegido, el sis-



El precursor de los capitanes automáticos. Este petrolero de 258.000 toneladas, construido por Mitshubishi Heavy Industries, está equipado con un sistema de guía informatizado

tema presenta la ruta prevista en una pantalla, donde también informa de los movimientos de hasta 40 buques próximos. Si alguno de esos buques sigue una derrota convergente, el sistema emite un aviso y calcula un rumbo evasivo optimizado, que presenta en la pantalla. La maniobra sugerida se basa en los datos del mapa digitalizado, y esquiva arrecifes y bajos para evitar que el buque embarranque o quede varado.

En ausencia de peligro inminente, el sistema toma y acumula los datos de la navegación, planea rumbos óptimos que tienen en cuenta las condiciones meteorológicas presentes y previstas, y actúa como piloto automático. Por supuesto, hace mucho tiempo que los barcos tienen piloto automático, pero el sistema que los marinos llamaban "Iron Mike" ("el Miguelito de hierro") en el pasado se limitaba a mantener fijo el rumbo. El superpuente, gracias al Sistema de Localización Global, puede registrar la posición actual y mantener el buque en su rumbo sin que el viento o las corrientes lo desvíen.

En la actualidad, el mapa digitalizado que el superpuente necesita se tiene que producir carta por carta para cada barco y ruta. No hay banco de mapas digitalizados para los océanos del mundo que haya sido aprobado por todas las naciones marítimas, ni siquiera por una sola nación. Esta situación debería cambiar pronto. La Organización Marítima Internacional está elaborando un sistema normalizado de información con presentación electrónica de mapas. Por el momento, la MHI les digitalizará las cartas a los armadores, quienes, según las leyes marítimas japonesas, no están autorizados a hacerlo por sí mismos. La propia MHI debe obtener permiso del servicio japonés de guardacostas.

Queda abierta la cuestión de si la perspectiva de superpetroleros que surquen las rutas comerciales de los océanos del mundo sin tripulación será alguna vez aceptable desde el punto de vista geopolítico. Pero el poder guardarle las espaldas a la falibilidad humana con buques manejados completamente por ordenador es una innovación bienvenida en una época en que ecosistemas muy frágiles están cada vez más amenazados por desastres marítimos. Quizá sea más famoso el *Exxon Valdez* que el *Bounty* del Capitán Bligh. Es muy posible que estos accidentes, de no existir una mejora del control del tráfico marítimo, ocurran cada vez con mayor frecuencia. Se prevé que dentro de diez años podrían pasar por el estrecho del Bósforo 1200 superpetroleros por año, cada uno de los cuales transportará más de 100.000 toneladas de crudo desde las antiguas repúblicas soviéticas, ávidas de ingresos, hacia las economías industriales, hambrientas de energía. (*Robert Patton.)*

Ecoquímica

Benceno por azúcar

La vida acostumbraba ser fácil para el químico dedicado a la síntesis. Simplemente tenía que saber mezclar ciertos productos químicos baratos y corrientes para obtener altos rendimientos de uno de los miles de ingredientes industriales que forman parte de los atalajes de la vida moderna, desde las ruedas para patines de cuchilla hasta el Valium. Ahora, el mundo del químico industrial se ha complicado, si no ensombrecido. Muchos de los ingredientes en las recetas tradicionales figuran en la lista negra de los cancerberos ecológicos de la Agencia de Protección Ambiental (EPA).

Pero la EPA no se ha limitado a guardar el coto. Hace un año, la agencia puso en marcha un programa de pequeñas subvenciones para estimular el descubrimiento de opciones alternativas, no lesivas, a los miles de millones de substancias tóxicas que cada año se dejan escapar al ambiente.

Las subvenciones, que corresponden al Proyecto de Programa Ambiental de la agencia, han espoleado a los químicos a fijarse en el almidón de maíz, la luz solar y otros sustitutivos de los catalizadores de metales pesados, disolventes bencénicos y un montón de otros villanos de la película. El programa representa cierto cambio de rumbo en el proceder habitual de la agencia. "El comportamiento de la EPA sobre la química ambiental ha sido tradicionalmente el de la máquina apisonadora, más que el de matraz", dice Paul A. Anastas.

A fines de agosto, la EPA expuso los resultados iniciales de la iniciativa. Ayudó a organizar el primer simposio sobre síntesis química sustitutiva en la reunión bienal de la Sociedad Química Americana. El trabajo académico patrocinado por la agencia marca una orientación radicalmente distinta respecto a los procesos químicos al uso. Se vio en los trabajos de John W. Frost, químico que cree que determinados productos metabólicos de los microorganismos podrían reemplazar los disolventes carcinógenos; el benceno, por ejemplo.

Con sus colaboradores de la Universidad de Purdue en West Lafayette, Frost ha propuesto usar la glucosa, que no resulta tóxica y es uno de los componentes del almidón y del azúcar de mesa ordinarios, como alternativa en procesos que emplean el benceno, derivado del petróleo. Para fabricar este biocatalizador, el grupo de Purdue ha manipulado la constitución genética de la enterobacteria *Escherichia coli*.

E. coli metaboliza la mayor parte de la glucosa disponible para proporcionar energía. El grupo de Purdue ha modificado la constitución genéti-

ca de la bacteria para que envíe más glucosa hacia la síntesis de aminoácidos, que son los sillares de la construcción de las proteínas. Antes de poder fabricar aminoácidos, una enzima descompone un producto químico derivado de la glucosa para producir catecol. Los genes determinantes de esta enzima se introdujeron, de otros microorganismos, en *E. coli*. El catecol es uno de los ingredientes del sabor a vainilla. También entra en la formación del ácido adípico, componente clave en la fabricación del nylon. De no haber sido así, ambos productos químicos hubieran necesitado del benceno, un carcinógeno, como materia prima.

Los microorganismos que transforman la glucosa lo tendrán difícil para igualar el bajo precio del ácido adípico que proviene de la petroquímica. Pero, ¿y el impacto ambiental? El proceso del grupo de Purdue no emite óxido nitroso, destructor del ozono, y las diversas reacciones se pueden llevar a cabo a unos modestos 37 grados Celsius. Una firma de biotecnología, Genecor International, está considerando establecer una planta piloto que empleará glucosa para fabricar ácido quínico, material de partida para la hidroquinona, en un proceso que emplea una reacción biocatalítica similar. Frost formó recientemente su propia compañía para proporcionar microorganismos a los procesadores químicos o de grano interesados en estos métodos.

Los químicos subvencionados por la EPA han recurrido a las plantas, no sólo a las bacterias intestinales, en busca de inspiración. Gary A. Epling, de la Universidad de Connecticut, ha empleado colorantes alimentarios y una lámpara doméstica de segunda mano para crear un catalizador que sustituye a los metales pesados en la reacciones de oxidación corrientes. George A. Kraus, de la Universidad pública de Iowa, ha dado cuenta de cómo una lámpara ultravioleta podría iniciar una reacción que normalmente requiere reactivos tóxicos. Y James Tanko, del Instituto Politécnico de Virginia, ha puesto a prueba el dióxido de carbono supercrítico (dióxido de carbono en un estado intermedio entre el de líquido y el de gas) como disolvente para sustituir a dos productos carcinógenos y ambientalmente malignos, el tetracloruro de carbono y el benceno, así como el freón, un halocarburo que reduce el ozono.

Con todo, la corriente mayoritaria de los químicos industriales aboga por una versión moderada de síntesis "verde": la que tiene en cuenta el color del dinero. Las patentes de muchos productos químicos expiraron hace mucho tiempo. Reemplazar la calavera y las dos tibias cruzadas de un bidón de 250 litros por una etiqueta verde puede llevar consigo no sólo un sorprendente éxito de relaciones públicas, sino también nuevos beneficios de productos que sustituyen a los artículos anticuados. Monsanto ha inventado un proceso que elimina el fosgeno, terrible instrumento de guerra química, en la fabricación del isocianato, un producto químico intermedio que forma parte de las espumas de uretano y resinas. Una planta piloto en el cuartel general de Monsanto en San Luis, Missouri, está también investigando sustitutivos del cloro en un proceso ampliamente usado que da por resultado materiales para fibras y cubiertas de neumático. El benceno está todavía presente en la última formulación, pero la nueva receta evita tener que librarse de montañas de cloruros.

Los profesionales han venido confinando la química del medio ambiente al ámbito de la limpieza de los desechos, en vez de apostar por la creación de moléculas de nuevo cuño. La EPA y la Fundación Nacional de Ciencia quieren configurar un estatuto que tenga en cuenta la prevención de la contaminación cuando se proyectan nuevos productos químicos. Se proponen involucrar en esa tarea a los jóvenes. En primavera, funcionarios de las dos agencias se reunirán con los editores para tratar de convencerlos de que insistan en ese enfoque en los manuales. La EPA, por su parte, está también examinando programas informáticos de sistemas expertos que puedan señalar diferentes caminos químicos para llegar a una molécula objetivo.

Mientras tanto, poderosas compañías cerealistas en busca de nuevos mercados se orientan hacia el procesado industrial de productos bioquímicos. Archer Daniels Midland ha empezado a convertir el almidón de maíz en el aminoácido triptófano para alimentación de animales, a sólo uno o dos pasos químicos de distancia de confeccionar tintura de índigo. Las reacciones necesarias para hacer tejanos con aspecto gastado no son muy diferentes de las que Frost logra con sus microorganismos. (*Gary Stix.*)



John W. Frost, de la Universidad Purdue, sujeta un frasco que contiene microorganismos capaces de descomponer una solución de azúcar obtenida de almidón de maíz en productos químicos industriales

Taller y laboratorio

Daniel J. Klingenberg

Imanes que transforman fluidos en sólidos

Con una bandeja para hielo y un congelador, todos podemos transformar un líquido en un sólido. Pero, ¿podría el lector solidificar un fluido y luego licuarlo en cuestión de segundos? Lo único que necesita es un campo magnético intenso y la sencilla receta de un fluido magnetorreológico.

Los así denominados son fluidos con partículas suspendidas en su seno. Cuando se los somete a un campo magnético, las partículas se alinean de tal modo que la mezcla se hace sólida. Cuando se retira el campo, las partículas retornan a su estado aleatorio y la sustancia se licúa. El grado de solidificación depende de las propiedades intrínsecas del fluido y de la intensidad del campo magnético aplicado.

Los fluidos magnetorreológicos no son tan comunes como los electrorreológicos, que se solidifican en presencia de campos eléctricos y que han sido empleados ya en prototipos de frenos, embragues, amortiguadores, soportes de motor, encendidos, válvulas de mando e incluso articulaciones artificiales.

DANIEL J. KLINGENBERG, especialista en fluidos electrorreológicos, enseña ingeniería química en la Universidad de Wisconsin en Madison.

Pero los aficionados harán bien experimentando con fluidos magnetorreológicos antes de intentar nada con sus homólogos eléctricos. La mayoría de éstos requieren tensiones eléctricas muy elevadas. Por ejemplo, para solidificar una mezcla de aceite de maíz y sémola harían falta algunos miles de volts (pero la intensidad de la corriente que atravesaría el líquido sería muy baja).

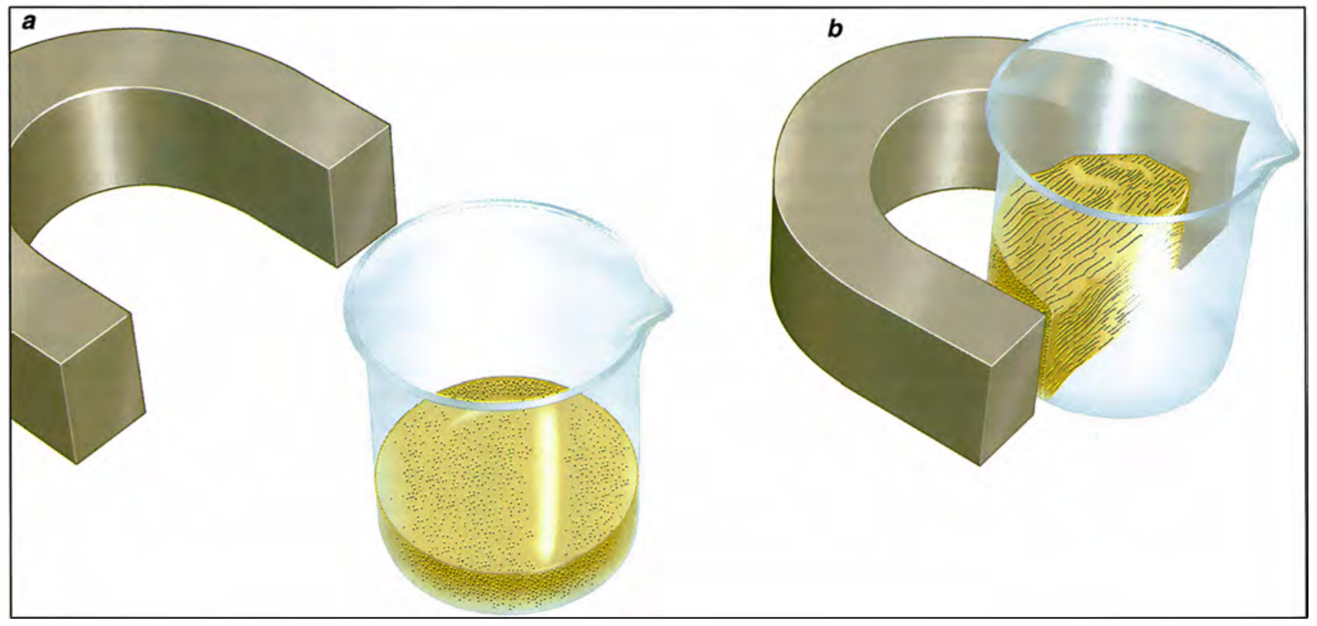
Un fluido magnetorreológico muy simple es el constituido por limaduras de hierro y aceite de maíz.

El tamaño de las limaduras determina la magnitud del efecto magnetorreológico observado. Conviene que las limaduras sean lo bastante grandes para que se distingan unas de otras con una lente de aumento, pero sin sobrepasar el milímetro de longitud. Las que sean demasiado grandes pueden fácilmente reducirse de tamaño con ayuda de una cuchara y una superficie dura. Tenga en cuenta que el hierro arañará la superficie.

No importa mucho el tipo del aceite en que se suspendan las limaduras. Tiene que ser más viscoso que el agua, para refrenar la velocidad con que se asientan las limaduras. Yo he empleado aceite de maíz, de linaza, de silicona y para motores. Acaso el mejor sea el de maíz.

Las limaduras y el aceite deben mezclarse en un recipiente pequeño y transparente: un bote de aspirinas limpio, una copa de plástico o, como en mi caso, un vaso ancho de laboratorio, de 100 mililitros. Asegúrese de que puede ver hasta el fondo del frasco. El fluido debe componerse de unas 25 partes en peso de aceite por cada 100 partes en peso de limaduras de hierro. Pero las proporciones exactas de los componentes no son críticas para que pueda observarse algún tipo de efecto magnetorreológico.

En lo que atañe al campo magnético, puede servir casi cualquier tipo de imán permanente que genere un campo



1. CON LIMADURAS DE HIERRO suspendidas en aceite de maíz se consigue un sencillo fluido magnetorreológico. La mezcla permanece líquida (a) hasta que se le acerca un imán. Las limaduras se alinean entre los polos, formando unas masas rígidas y filamentosas que pueden ser empujadas hacia un costado del recipiente (b). La sustancia vuelve a su estado líquido original cuando se retira el campo magnético

intenso: de herradura, recto e incluso los de algún viejo altavoz (los de frigorífico son demasiado débiles). Los imanes suelen designarse por el peso del que pueden tirar. Hágase usted con los más potentes que encuentre. Yo compré dos imanes rectos de "50 kilos" en una ferretería.

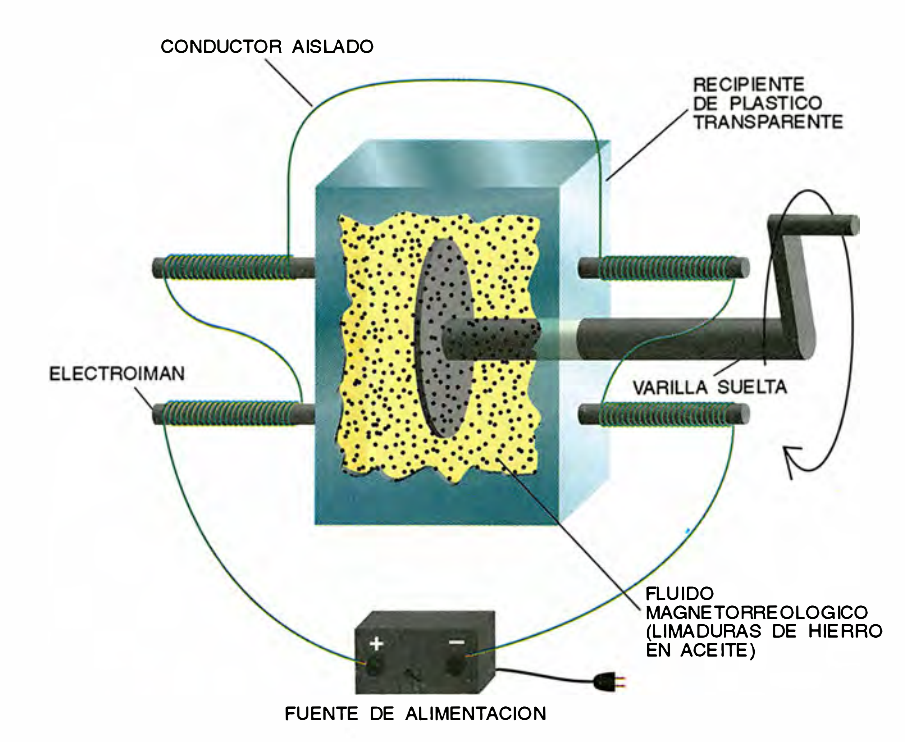
Los electroimanes son asimismo una opción. Se hacen arrollando un cable conductor fino aislado en torno a una barra metálica y conectando los cabos a una batería. El campo magnético es más intenso en las proximidades de los extremos del cable arrollado. No importa que arrolle el cable de un extremo a otro o al revés, o hacia adelante y hacia atrás varias veces. Basta con que se asegure de que el arrollamiento tenga siempre el mismo sentido (o sea, siempre horario o antihorario) y que esté tenso. Serían suficientes dos capas de arrollamiento sobre unos cinco centímetros del núcleo.

Con varias baterías conectadas en serie puede aumentarse la potencia suministrada al electroimán e intensificar así el campo magnético. Adviértase, no obstante, que un electroimán consume mucha corriente y agotará enseguida las baterías. Es más aconsejable una fuente de alimentación que desarrolle una tensión de varios volts. Aunque sea muy divertido tratar de crear un buen electroimán, resultará difícil, en lo que respecta a tiempo y comodidad, superar a un imán permanente si no se pretende otra cosa que jugar con un fluido magnetorreológico.

Con el fluido y el imán ya preparados, podrá usted observar el efecto magnetorreológico. Primero, agite el fluido con un trozo de madera o plástico (si emplea un objeto magnetizable, las limaduras se adherirán a él), manteniendo el imán al menos a quince centímetros del recipiente. Debería comprobar que el combinado de aceite y limaduras se comporta como un fluido; o sea, que sigue llenando el recipiente y tiende a formar una superficie plana y lisa cuando cesa la agitación. Su consistencia será la del jarabe de arce.

Acerque el imán al recipiente. Si utiliza un imán de herradura, coloque el recipiente justo entre los brazos. Si dispone de dos imanes, ponga los polos opuestos a uno y otro lado del recipiente y enfrentados. Cuanto más cercanos estén los polos, tanto más intenso será el campo magnético dentro del fluido. Si sólo tiene un imán, apoye uno de los polos contra el costado del recipiente.

Agite otra vez el fluido y observe que empieza a comportarse como arena húmeda. En el fondo del recipiente habrán de separarse terrones de textura filamentosa, que deberían conservar su forma y mantenerse en suspensión en el fluido después de que retire el agitador. Su aspecto es fibroso porque las limaduras tienden a unirse por los extremos, partiendo de los polos del imán. Aleje entonces el recipiente del imán. La mezcla de aceite y limaduras volverá a ser fluida muy deprisa; los terrones se disgregarán y la superficie se hará lisa y horizontal. Si no observa estos efectos, lo más probable será que necesite un imán más potente o que tenga que cambiar la consistencia del fluido.



2. EL FRENO MAGNETORREOLOGICO se basa en un disco montado en una varilla. La aplicación de un campo magnético impide que la varilla gire. Cabe emplear baterías en vez de una fuente de alimentación conectada a red, pero se agotarán rápidamente

Como variante, repita usted el experimento con distintas proporciones de limaduras y aceite. La combinación óptima depende del tamaño de las limaduras y del tipo de aceite. Trate también de variar la distancia entre los polos del imán y el recipiente, o emplee un imán más potente.

Un proyecto mucho más atractivo es el de la construcción de un freno magnetorreológico elemental. Puede que aquí le hagan falta habilidades mecánicas. Introduzca el extremo de una varilla en un recipiente de plástico lleno de fluido magnetorreológico. La varilla debe ser de un material no magnetizable, tal como plástico o aluminio. Podría intentar sujetar un disco de plástico al extremo de la varilla inmerso en el fluido, puesto que cuanto mayor sea la superficie en contacto con el fluido, tanto más acusado será el efecto. Para que el fluido no rezume, quizá tenga que colocar una arandela de goma alrededor de la varilla en el punto donde ésta penetra en el recipiente.

Y ahora no queda más que introducir el recipiente en un campo magnético. Si emplea usted electroimanes, le sugiero que cablee algunos perpendicularmente al disco sumergido en el fluido. Asegúrese de que arrolla el conductor en el mismo sentido en torno a cada núcleo.

Antes de aplicar el campo magnético, la varilla gira con poca o ninguna resistencia. (Para que la rotación de la varilla sea más visible, podría doblarla por el extremo o fijar a éste algún tipo de empuñadura.) Al aplicar el campo magnético, el fluido se solidifica y cuesta mover la varilla.

Como acaso perciba el lector en esta combinación de limaduras de hierro y aceite de maíz, es frecuente que estos fluidos no se solidifiquen con tenacidad y tiendan a debilitarse con el tiempo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

FERROHYDRODINAMICS. R. E. Rosensweig. Cambridge University Press. 1985.

ELECTRORHEOLOGICAL FLUIDS: PROCEEDINGS OF THE SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE. Dirigido por J. D. Carlson, A. F. Sprecher y H. Conrad. Technomic Publishing, Lancaster, Pa., 1990.

Juegos matemáticos

Ian Stewart

En casi todas las tablas numéricas es más probable que los valores empiecen por los números más bajos

Por donde la feria se acababa, los colores eran más oscuros y apenas había nadie. Sólo una de las casetas había logrado atraer a unas decenas de curiosos. Logré colarme hasta las primeras filas. En un cartelón rotulado a mano se leía: NUMBO, NIGROMANTE NUMEROLOGO. Por fin alcancé a oír la sorprendente cháchara del presentador: "¿Así que quiere saber las poblaciones de los atolones administrativos de la República de las Maldivas? Pues se lo voy a decir, no crea, aunque veo que le van las preguntas rebuscadas. Yo apuesto a las cifras uno y dos; usted, a todas las demás. Y es que a mí me gusta regalar el dinero, porque soy de buen corazón, ¡un filántropo! Así que por cada mil pesetas que apueste yo le ofrezco devolverle mil quinientas si gana, y eso a pesar de que mis probabilidades de ganar son sólo de una en cinco. ¿De acuerdo?" "Dos en nueve", dijo una joven con uniforme de enfermera. "La primera cifra nunca es cero."

Numbo tenía a sus espaldas una gran pantalla de ordenador en la que aparecieron los nombres de los atolones, de 1. HAA-ALIFU a 12. SEENU. La parte inferior de la pantalla ordenaba: ELIJA UN NUMERO. El apostador optó por el 5. Se leyó entonces en la pantalla:

ATOLON NUMERO 5: RAA
CAPITAL: UGOOFAARU
POBLACION: 11.303

Numbo sonrió de oreja a oreja. "El primer dígito es un uno. ¡Señor, yo gano! ¡Muchas gracias por jugar! ¿Quién va ahora? Una mujer apostó mil pesetas al consumo anual de energía en Bangladesh, medido en kilovatios-hora, y ganó mil quinientas cuando el oráculo indicó que se elevaba a 7440 millones. La señora volvió a apostar sobre el mismo dato para Italia y... perdió: 241.000 millones.

Comencé a comprender la idea del juego. Los apostadores (los "pardillos") elegían cierta categoría de datos, y de ellos se extraía de manera aleatoria un número. Lo único importante era el primer dígito (necesariamente no nulo). Si esta primera cifra resultaba ser 1 o 2, Numbo se embolsaba las mil pesetas del apostador; si era 3, 4, 5, 6, 7, 8 o 9, el jugador las recibía de vuelta, y quinientas más. Suponiendo que los primeros dígitos fueran todos equiprobables, la probabilidad de perder las mil pesetas sería de 2/9, mientras que la de ganar 500 sería de 7/9. Esto es, la ganancia esperada sería de $500 \times (7/9) - 1000 \times (2/9) = 1500/9$, o sea, un beneficio medio de unas 167 pesetas en cada envite.

La cosa parecía una bicoca a pesar de que ni por un momento podía uno tragarse lo del filantrópico corazón de Numbo. El juego había de tener truco, pero ¿cuál?

Aposté 10.000 pesetas sobre las poblaciones de los cantones de Letonia. Dio la impresión de que Numbo dudaba en aceptar, pero al cabo de unos segundos hizo un gesto afirmativo con la cabeza. El ordenador nos informó que:

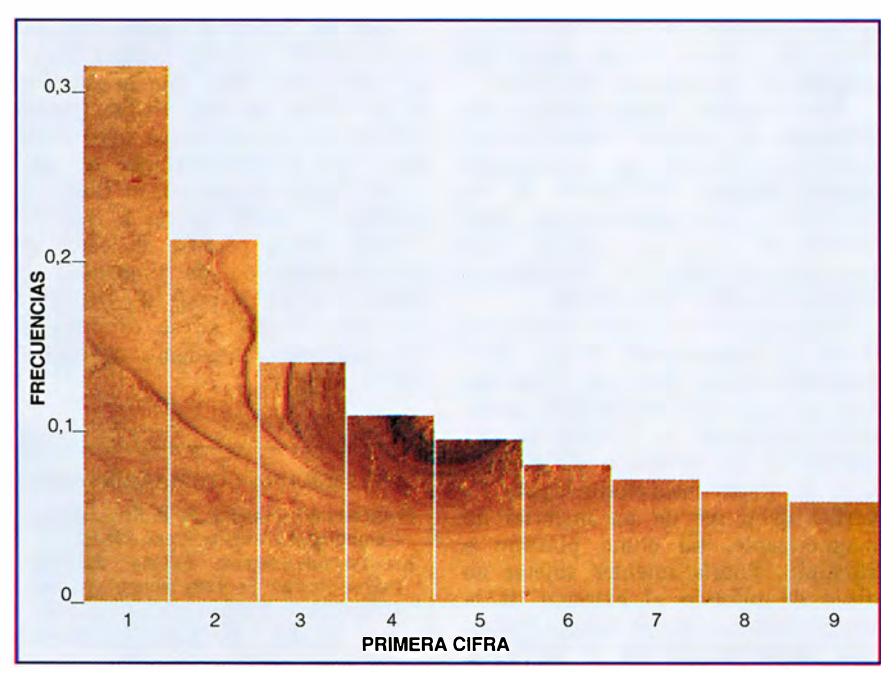
HAY VEINTISEIS DISTRITOS EN LETONIA, A SABER:
1. AIZKRAUKLLE
...
26. VENTSPILS
ELIJA UN NUMERO

Seleccioné el 23, y resultó:

23. TUKUMS
POBLACION: 59.200

Me embolsé con delectación mis 15.000 pesetas. Al recoger el dinero de la mano de Numbo, hubo algo en sus movimientos que me hizo pensar que ya le conocía de antes...

De pronto me lo imaginé con capa. Era... ¡Matthew Morris Maddox, el matemago! Le había visto por última vez en el escenario de un teatro. ¿Qué estaba haciendo aquí? Debió de leer la sorpresa en mi rostro. Me lanzó una mirada y me siseó: "Nos veremos después de la actuación; calle Gerbil, en *El Tritón Abstemio*." Se lanzó rápidamente so-



1. Frecuencias teóricas previstas por la ley de Benford para la primera cifra

bre la víctima siguiente. Me escurrí entre la multitud y me fui de allí.

El Tritón Abstemio era un lugar muy tranquilo. Me instalé en un rincón con una cerveza. No quería que pareciese que esperaba a alguien, pero fracasé de todas todas. Media hora más tarde llegó Maddox, con paso cansino.

—Hola, Matt –le saludé–. ¿Cómo tú por la feria?

—Por un terrible accidente –murmuró–. ¿Conoces el viejo truco de aserrar en dos a una chica metida en una caja? Lo hice con un rayo láser y algo salió mal.

—¡Oh, no! ¡Pobre Verónica...!

—No, no, por Dios. Verónica se encuentra perfectamente. Lo que pasó es que el rayo láser incidió por accidente en un espejo que estaba en el escenario no sé por qué, se reflejó luego en una lámpara y cercenó la base del palco del alcalde, quien se quedó colgando, y con él una joven... que no era su mujer. El resultado es que me ha sido retirada durante un año la licencia de artista y he tenido que recurrir a medidas desesperadas.

—¿Y tienes licencia para actuar en las ferias?

—Bueno... Y hablando de preguntas: ¿elegiste deliberadamente el ejemplo de Letonia?

—Pues claro que no. ¿Tiene algo de especial?

—Los distritos de Letonia han sido elegidos de forma que su población ronde en torno a las 50.000 personas, excepto el de Riga, que es tres veces mayor, debido, supongo, a que hubiera sido un problema dividirlo. Los sesgos de ese tipo echan a perder los cálculos de probabilidades.

—¿Qué sesgos? ¿De qué probabilidades hablas?

—No obedecen la ley de Benford.

—¿Cómo has dicho, Matt?

—Numbo –corrigió Maddox–. Te acordarás de que, antes de las calculadoras electrónicas, para las multiplicaciones y divisiones complicadas se utilizaban tablas de logaritmos. La historia comienza cuando alguien –no tengo ni idea de quién fue– hizo el importante descubrimiento de que las páginas iniciales de las tablas de logaritmos de las bibliotecas públicas estaban más sucias que las páginas cercanas al final.

—Mira, eso podría ser lógico si el libro fuese, pongamos por caso, *La historia del tiempo* de Stephen Hawking. Querría decir que mucha gente lo empezó y después lo dejó.

—Como ha ocurrido en la mayor parte de los casos. Pero no es normal manejar una tabla de logaritmos como un libro de lectura, ¿verdad? La razón de que las páginas iniciales estuvieran más sobadas fue descubierta en 1938 por el físico Frank Benford; pero su descubrimiento creó más problemas aún de los que explicaba. Benford sostenía que los números con que se encuentran los físicos e ingenieros en sus cálculos tienen mayor probabilidad de empezar por 1 que de empezar por 9.

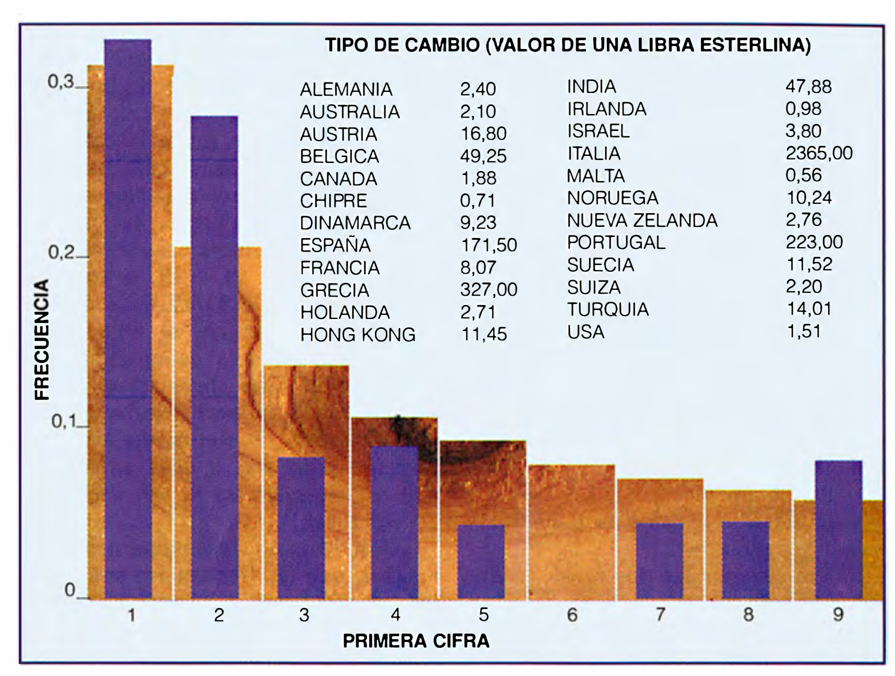
—¿Sí? ¿Y por qué diablos habría de ser así?

—Volveré a eso dentro de un momento. Benford descubrió que la frecuencia de aparición de un dígito inicial dado –o equivalentemente, la probabilidad de que este dígito tome un valor dado– decrece de forma regular al ir aumentando los dígitos de 1 a 9.

Me eché a reír.

—Venga ya, Matt. Todos los dígitos han de ser equiprobables.

—No tan rápido. Benford analizó veinte series diferentes de datos numéricos, entre las que figuraban superficies de lagos y masas moleculares de compuestos. Descubrió empíricamente que la probabilidad de que el primer dígito decimal sea n está dada por la fórmula $\log(n + 1) - \log(n)$, siendo los logaritmos de base 10. El valor $n = 0$ se excluye, porque el dígito inicial es por definición el primer dígito no nulo. Benford la llamó Ley de Números Anómalos, aunque hoy es conocida por ley de Benford (*véase la figura 1*). Desde entonces ha sido verificada en miles de series de datos. Todo aquello me resultaba difícil de creer, y así lo dije.



2. Frecuencias de la primera cifra de tipos de cambio, comparadas con la ley de Benford

—Dentro de un momento te convenceré de que te equivocas al pensar que las probabilidades han de ser iguales para todas las cifras. *Obviamente* no es así. La distribución logarítmica de Benford no es tan fácil de establecer, sin embargo. Pero supongamos que sea correcta. ¿Comprendes ya por qué funciona mi pequeña... artimaña?

—Si admitiéramos esa curiosa ley –reflexioné–, la probabilidad de que la primera cifra decimal fuese 1 sería $\log 2 - \log 1 = 0{,}301+$. Y la de que fuese 2 sería de $\log 3 - \log 2 = 0{,}477+ - 0{,}301+ = 0{,}176+$. En tal caso, la probabilidad de ganar con 1 o con 2 es la suma de ambas, o sea, 0,477+, algo menos del 50 por ciento. La ganancia esperada es muy aproximadamente: $1000 \times 0{,}477 - 500 \times 0{,}523 = 215{,}6$. ¡Así que, golfo sin escrúpulos, en promedio ganas más de doscientas pesetas por envite!

—Veo que empiezas a creer en la ley de Benford.

—¡Por completo! Te conozco, viejo truhán. *Tiene* que ser verdad. Ya estoy listo para que me convenzas.

—Humm... Todavía no. Realicemos antes algunos experimentos. Después estarás preparado.

—No discutiré contigo. ¿Qué clase de datos he de utilizar?

—Valen los de cualquier tipo, con tal de que no tengan limitado el campo de valores del dígito inicial. No valdrían, por ejemplo, las edades

de las personas o el número de letras del día de la semana.

—¿Y si propongo los tipos de cambio para turistas?

—Razonable.

—Vale, pues.

—Estudié este caso. Los números de veces (dado entre paréntesis) que aparecen los distintos dígitos iniciales eran:

1(8) 2(7) 3(2) 4(2) 5(1) 6(0) 7(1) 8(1) 9(2)

que se aproximan bastante a la ley de Benford (*véase la figura 2*).

—Probemos con otra cosa. ¿Y si mirásemos las superficies de las islas Bahamas?

—Perfectamente.

—¿En millas cuadradas o en kilómetros cuadrados?

—Examinemos las dos series (*véase la figura 3*).

—Estas no encajan tan bien como los tipos de cambio.

—No, pero es que estás utilizando series de datos muy cortas. Y de todas maneras, se advierte una fuerte dominancia de unos y doses.

—No insisto más. Pero, dime, ¿por qué son los dígitos más pequeños los más frecuentes?

Maddox me susurró al oído su razonamiento, como si fuéramos conspiradores.

—Piensa en una calle bordeada de casas por una sola acera, numeradas a partir de 1. La probabilidad de que la primera cifra sea un dígito dado varía considerablemente con el número de casas que tenga la calle. Si sólo hay nueve casas, cada número aparece con la misma frecuencia, pero si hay diecinueve, la cifra 1 aparece en la primera casa y también en las números 10 a 19, o sea con una frecuencia de 11/19, más del 50 por ciento. Al crecer el número de casas, la frecuencia de aparición de una primera cifra dada crece y decrece de una manera regular y calculable (*véase la figura 4*). Las frecuencias sólo son iguales cuando el número de casas es 9, 99, 999...

—¡Ya veo!

—Por lo tanto, la conjetura inicial, a saber, que las frecuencias son iguales, es incorrecta. Observarás que la gráfica repite más o menos unas mismas formas periódicamente, con que en el eje horizontal se use una escala logarítmica. Y eso es debido a que se observan las mismas variaciones entre dos potencias de 10 consecutivas. Entonces, si hallamos la media de las fluctuaciones de las frecuencias, en más o en menos, al ir variando el número de casas, obtendremos la ley de Benford.

—Me fío de lo que dices.

—A condición de que esos promedios hayan sido correctamente evaluados. Podría parecer que éste es el fin del cuento, pero las medias estadísticas dependen de las hipótesis que se hayan adoptado. Las longitudes de las calles no son igualmente probables.

—No. De hecho, si la ley de Benford es verdadera, también las primeras cifras de sus longitudes deberían atenerse a ella.

—Exactamente. Y al desarrollar este tipo de ideas desembocamos en una preciosa propiedad de la ley de Benford: es invariante bajo cambios de escala, o sea, independiente de la escala utilizada. Poco importa que se midan las áreas de las islas Bahamas en kilómetros cuadrados o en millas cuadradas, que se multiplique por siete el número de todas las casas, que la vida media de las partículas alfa se cuente en siglos o en segundos: si la muestra es lo bastante grande seguirá obedeciendo a la misma ley. Un cierto profesor Pinkham, de la Universidad de Rutgers, ha demostrado que la ley de Benford es la única ley de distribución de probabilidad que tiene la propiedad de ser invariante bajo cambios de escala.

—¿No estarás diciéndome que las observaciones de Benford deben ser consideradas demostración de la existencia de fenómenos invariantes bajo cambios de escala en la naturaleza?

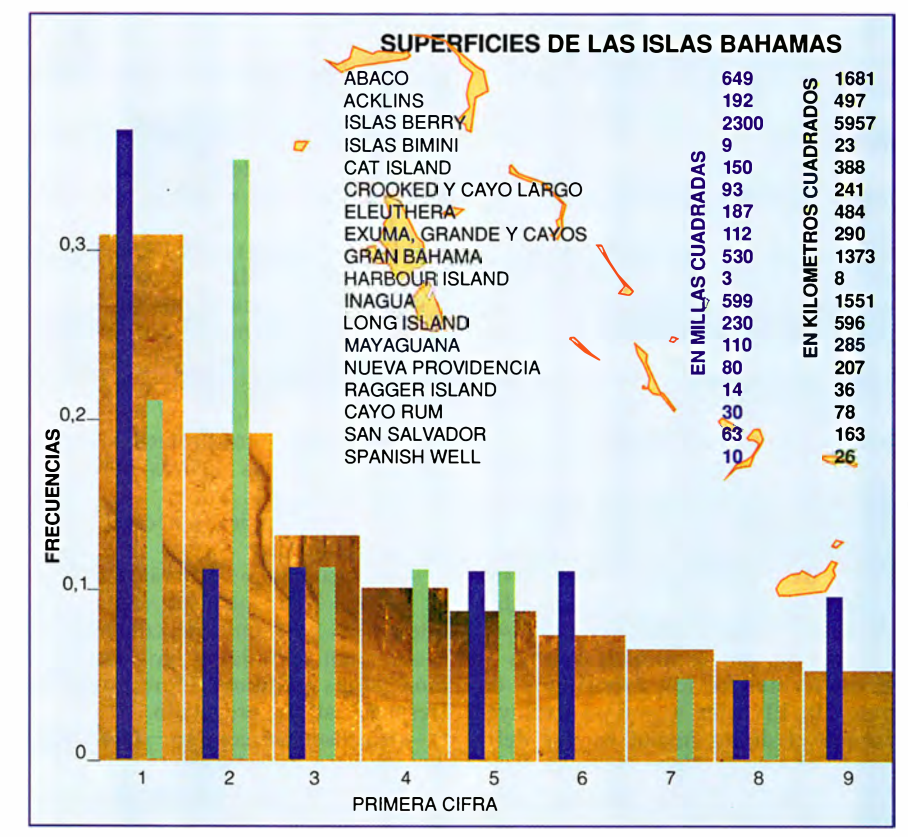
Maddox afirmó con la cabeza.

—A nosotros, los humanos, nos gusta contar mediante progresiones aritméticas como 1, 2, 3, ... Por eso nos asombra encontrar que las probabilidades de aparición de las primeras cifras son desiguales; pero estas desigualdades podrían explicarse si la naturaleza eligiese con probabilidades iguales entre los términos de una progresión geométrica x, x^2, x^3...

—Sí, pero ¿por qué habría la naturaleza de operar de tan curiosa manera?

Maddox se revolvió en su silla, incómodo.

—Es difícil de saber, pero parece que es así. Puedes entretenerte en verificar la ley de Benford con tus propias tablas de datos: el número de ocasiones en que resulta aplicable es pasmoso. Supongo que dama Natura estará un poco harta de las escalas absolutas. Déjame que te cuente una confirmación muy reciente de la ley de Benford. Se trata de un estudio de B. Buck y A. Merchant, de la Universidad de Oxford, y de S. Perez, de la Universidad de El Cabo. Los datos que han utilizado son las vidas medias en las desintegraciones alfa, o sea, los tiempos



3. Frecuencias de la primera cifra de las áreas de las islas Bahamas, en millas cuadradas y en kilómetros cuadrados

que tarda un núcleo atómico en perder la mitad de su radiactividad por emisión de partículas alfa. Estos investigadores demostraron que la ley de Benford se aplica tanto a las vidas medias observadas como a las calculadas por los físicos (*véase la figura 5*). Consideraron también una fórmula más compleja que la descubierta por Benford, relativa a la distribución de probabilidad de la segunda cifra, y confirmaron también esta ley.

—Este es un ejemplo de lujo.

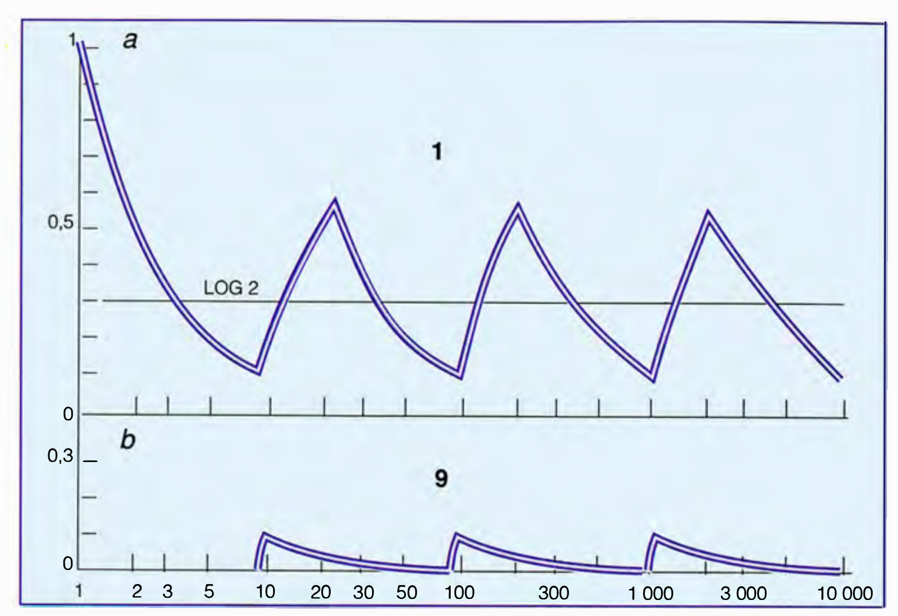
—Ya lo creo. Después, B. Buck y sus colaboradores hicieron notar que en el caso de la desintegración alfa la invariancia bajo cambios de escala admitía una explicación física. En 1928, George Gamow se valió de la entonces novísima teoría cuántica para describir esta descomposición. La partícula alfa reside en un pozo de potencial, del cual se escapa por un "túnel" a su través. La probabilidad de que se produzca tal suceso en un intervalo de tiempo dado se obtiene formando una "integral de efecto túnel" y elevándola a una potencia proporcional al tiempo. De este modo, los tiempos de escape por el túnel, las vidas medias por consiguiente, se corresponden de forma natural con una progresión geométrica y no con una aritmética. Si la naturaleza elige la integral del efecto túnel aleatoriamente con probabilidad uniforme, entonces la ley que hace depender las vidas medias de las partículas alfa de las potencias de estas integrales conduce a una invariancia bajo cambios de escala y, por tanto, a la ley de Benford.

Todo eso puede estar muy bien para la desintegración alfa, pensé yo, pero ¿qué decir de las áreas de las islas de las Bahamas, de la población de los atolones de las Maldivas o de los tipos de cambio? ¡Estos fenómenos no están gobernados por la física subatómica!

Hoy, los invariantes bajo cambios de escala por excelencia son los fractales de Mandelbrot; la independencia de la escala se manifiesta en su autosemejanza, es decir, la similitud de las partes, por minúsculas que sean, y el todo. En una interpretación "de último minuto" de la ley de Benford, los datos en cuestión están gobernados por cierto fractal subyacente, lo que convierte a la ley de Benford en parte de la teoría del caos, pues los fractales son la geometría natural de los sistemas dinámicos determinísticos de elevada complejidad. De esta forma, la ley de Benford nos dice que la numerología de la naturaleza es consecuencia de un caos dinámico que la subyace.

Parece bastante razonable. Es bien conocido que los fractales proporcionan modelos adecuados de los archipiélagos y los contornos litorales. Y son los procesos caóticos de la erosión natural los responsables de la estructura fractal. Todo casa...

Sea como sea, reconozco que ésta es una conclusión de muy altos vuelos para ser consecuencia de una teoría que nació de un escrutinio de libros sucios.



4. Variación de la frecuencia de la primera cifra de un número comprendido entre 1 y n, representada en función de n. (a) Cifra 1. (b) Cifra 9

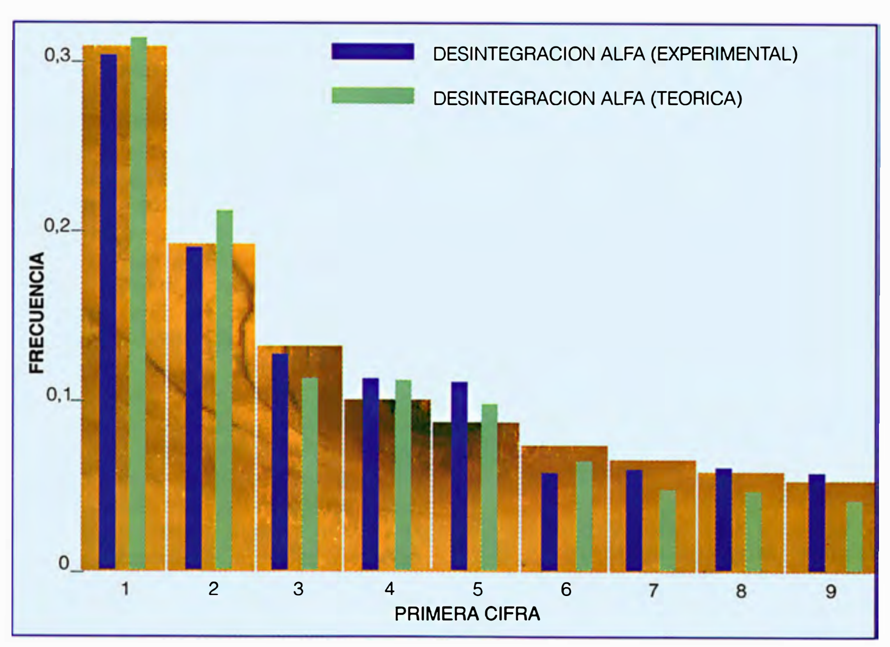
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE FIRST DIGIT PROBLEM. R. A. Raimi, en *American Mathematical Monthly*, n.º 83, páginas 521-538, 1976.

THE FRACTAL GEOMETRY OF NATURE. Benoît Mandelbrot, Freeman, San Francisco, 1982.

A NUMBER FOR YOUR THOUGHTS. Malcolm E. Lines, Adam Hilger, Bristol, 1986.

AN ILLUSTRATION OF BENFORD'S FIRST DIGIT LAW USING ALPHA DECAY HALF LIVES. B. Buck, A. C. Merchant y S. M. Perez, en *European Journal of Physics*, número 14, págs. 59-63, 1993.



5. Frecuencias de la primera cifra en las tasas de desintegración alfa de 477 núcleos. Valores experimentales y teóricos

Libros

Luis Alonso, Antonio Prevosti y Francesc Asensi

Nacimiento de la ciencia

Teofrasto

TEOPHRASTEAN STUDIES. ON NATURAL SCIENCE, PHYSICS AND METAPHYSICS, ETHICS, RELIGION AND RHETORIC. Dirigido por William W. Fortenbaugh y Robert W. Sharples. Transaction Books; New Brunswick, 1988.

THEOPHRASTUS OF ERESUS. SOURCES FOR HIS LIFE. WRITINGS, THOUGHT AND INFLUENCE. Dirigido y traducido por William W. Fortenbaugh *et alii*. E. J. Brill; Leiden, 1992.

THEOPHRASTUS. DE CAUSIS PLANTARUM. Dirección y traducción de Benedict Einarson y George K. K. Link. Harvard University Press; Harvard, 1990.

GESCHICHTE DER BOTANIK. LEBEN UND LEISTUNG GROSSER FORSCHER, por Karl Mägdefrau. Gustav Fischer Verlag; Stuttgart, 1992.

La sombra de Aristóteles dejó obscurecida demasiado tiempo la figura imponente de Teofrasto, en lo que tuvo parte importante no tanto la alegada tendencia especulativa del primero y la empírica del segundo cuanto la extracción filosófica de los comentaristas de ambos, o, por mejor decir, del primero, quienes, además, relegaban a Teofrasto en un secundario papel de escolarca.

La perspectiva comenzó a cambiar algo en el siglo pasado con la edición de las obras completas de Teofrasto, la teubneriana de manera destacada. Tímidamente comenzaron a aparecer trabajos sueltos sobre su obra botánica (O. Regenbogen) y algún que otro sobre sus textos filosóficos, en particular, sus apartados lógicos relativos a la argumentación (I. M. Bochenski).

Pero el giro decisivo tiene un nombre: Proyecto Teofrasto. En él se inscriben los dos primeros libros de cabecera, *Teofrastean Studies...* y *Theophrastus of Eresus Sources...*, alentados, como el propio plan, por William W. Fortenbaugh y su cátedra de la Universidad de Rutgers. La segunda obra inicia también la colección del *corpus* teofrasteo. Con el manejo de fuentes depuradas y la inspiración que avivan los ensayos recogidos en *Teofrastean Studies. On natural science, physics and metaphysics, ethics, religion and rhetoric*, resulta fácil pronosticar que muy pronto tendremos enmendada la primera página de la historia del pensamiento occidental, la que ha venido concediendo cuatro quintas partes de su extensión a Platón, Hipócrates y Aristóteles, con breves brochazos introductorios de presocráticos y un brevísimo apunte de Tírtamo.

Tírtamo era el nombre auténtico de quien, por la dulzura y elegancia de su lenguaje, Aristóteles le denominó Teofrasto. Nació éste en Eresos, en la costa sudoriental de la isla de Lesbos, hacia el 371 antes de Cristo. Durante su juventud se movió en un ambiente intelectual privilegiado: en su ciudad natal con Alcipo y, en Atenas ya a los dieciocho años, con Platón, Espeusipo, Xenócrates y Aristóteles.

De criterio independiente, no dudó en unir su suerte a la de Aristóteles, quien llegado el momento le confiará la educación de su hijo Nicómaco. Tras la muerte de Platón, partió con aquél hacia Assos, en la Tróade, y luego a Mitilene (en Lesbos). Acompañará a su maestro a Macedonia cuando a éste se le encargó la formación de Alejandro, y con él volverá a Atenas, momento en que Aristóteles funda el Peripatos. Teofrasto hereda su dirección, que regenta por 36 años, dotándolo de nuevos edificios y despertando el interés de numerosos alumnos; se dice que acudían en número de 2000. Murió en torno al 287 a. C.

Hombre de estudio, más que de escuela, a pesar de que así se definía, abarcó el saber entero del Liceo: física, historia natural, lógica, psicología, antropología, metafísica, historia de la ciencia, ética y política, poética y retórica. Diógenes Laercio, cuya *Historia de los filósofos* constituye a este respecto la fuente principal, numera unas 225 obras, de longitud, unicidad y autenticidad variables. Las más extensas, de las que nos ocuparemos más adelante, son los tratados botánicos; algunos opúsculos, como los *Caracteres* o la *Metafísica*, han gozado de amplia difusión. Pero, en su mayoría, los escritos teofrasteos (*Sobre los sentidos, Sobre el fuego, Sobre las piedras, Sobre los olores, Sobre el arte de hablar, Sobre la música*, etcétera) nos han llegado a través de citas dispersas aquí y allá por los autores clásicos y medievales, lo que pone de relieve el esfuerzo, otra nota distintiva, del magno empeño dirigido por Fortenbaugh *et alii* y viabilizado por la editorial E. J. Brill.

En *Teofrastean Studies* se abordan, por separado, determinados aspectos de sus escritos agrupados en cuatro grandes secciones: los *Opuscula*; botánica y ecología; física y metafísica, y ética, religión y retórica. Del tratado *Sobre los olores*, Georg Wörhle estudia su estructura y función, pormenorizando, párrafo a párrafo, los perfumes naturales y artificiales, con sus medios de conservación y detección, para llegar a la conclusión de que ese opúsculo, aunque fragmentario, puede considerarse el libro octavo del *De causis plantarum* teofrasteo.

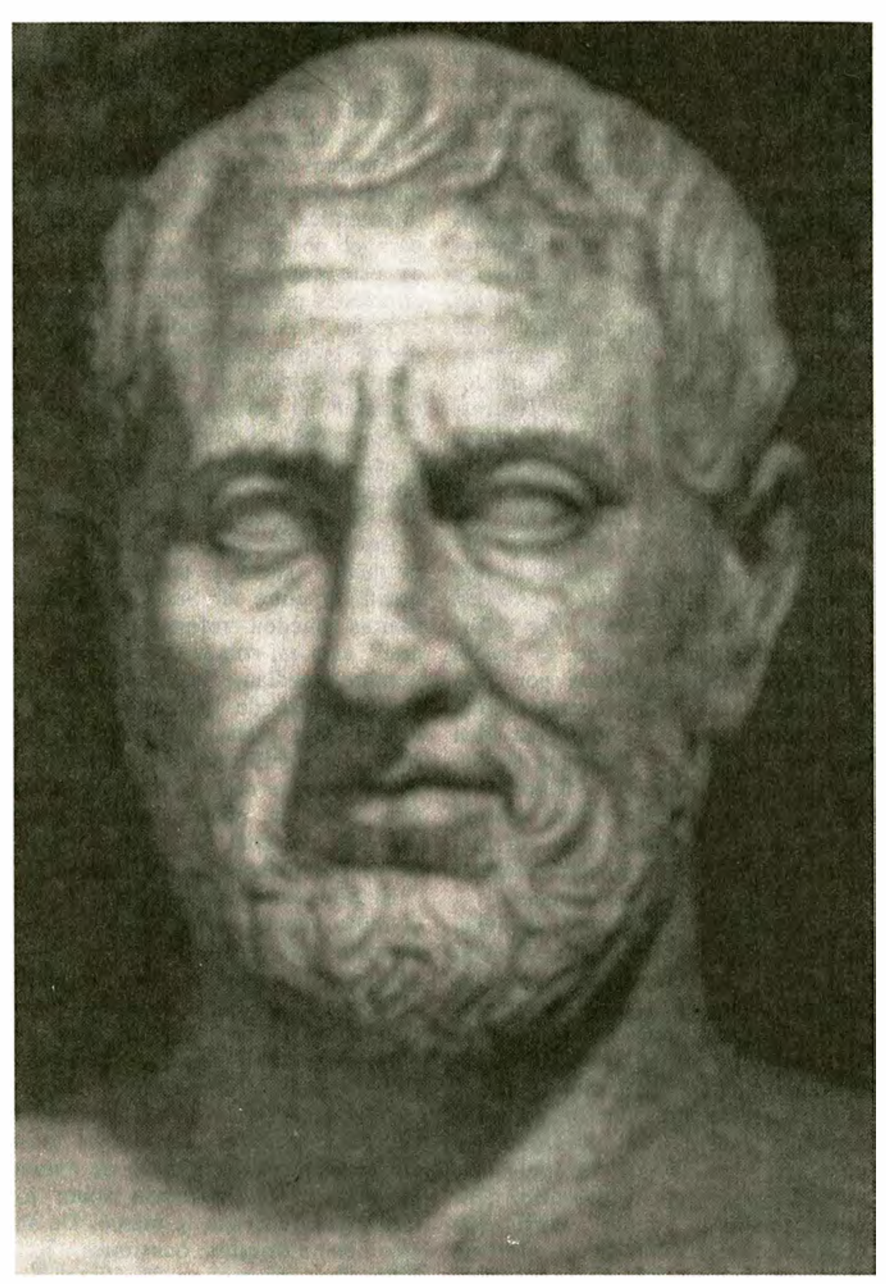
Michael G. Sollenberger abunda en esa misma línea identificadora de los tratados en su análisis de la relación entre los textos botánicos que nos han llegado y los señalados en el elenco de Diógenes Laercio, aportando además ciertas claves para descubrir los libros "perdidos" relativos a esa parcela de su quehacer naturalista. John Vallance se ciñe a la mineralogía de Teofrasto, es decir, a sus libros *Sobre las piedras* y *Sobre el fuego*, si bien engloba su exposición en un planteamiento general sobre teoría de la ciencia en el *Timeo* platónico.

La mayoría de los estudios aquí compilados ceden a la tentación de establecer paralelismos y puntos de convergencia con Aristóteles, ya sea de orden metodológico, ya sea de orden doctrinal, aunque sea para corregirle. Ejemplo de lo segundo es el artículo de Richard Sorabji sobre la definición de lugar, a propósito de la cual sostiene que Teofrasto reinterpreta el sentido de lugar natural en

la física aristotélica y plantea una serie de dudas (en particular, su bidimensionalidad, su movilidad o no, es decir, su relación con el cambio, y la rotación) que influirán en el pensamiento griego subsiguiente de dentro y fuera de la península.

Desde el punto de vista metodológico, el paralelismo más llamativo es el que se da entre la *Historia animalium* de Aristóteles y la *Historia plantarum* de Teofrasto, que, en mi opinión, podría obedecer a una tradición entonces muy asentada, y perceptible desde los pitagóricos, por más que en ambos cobre plenitud de desarrollo. Extendíase a cualquier tema científico (físico, cosmológico, médico o naturalista) y procedía de lo general a lo específico. Viene a ser una suerte de plantilla didáctica en la que el desenvolvimiento de las cuestiones procede con naturalidad y admite refinamientos e incorporaciones de nuevos datos. Allan Gotthelf resume los puntos de convergencia de la *Inquisición sobre los animales* y la *Inquisición sobre las plantas* en la identidad de propósitos, en la revisión clase por clase (de animales y plantas), esto es, en la estructura general por razón de las diferencias entre grupos, en la categoría epistemológica que les concede y en la afinidad del lenguaje para situaciones equivalentes.

Teophrastus of Eresus. Sources for his life, writings, thought and influence presenta, en dos partes literalmente soberbias, la primera entrega del Proyecto, dedicada a los textos, aparato crítico y traducción de los fragmentos y testimonios. Abarcan desde las biografías, la de Diógenes constituye como hemos dicho el manantial más fecundo para su vida y obras, hasta las referencias a sus escritos sobre la eficacia sanadora de la música.



Teofrasto de Eresos *(371-287 a. C.)*

El interés de la compilación no se limita a su evidente valor objetivo, el de poder disponer de los textos relativos al período fundacional de la ciencia, en línea mejorada del Diels sobre los presocráticos, sino que alcanza también su utilidad a los estudiosos y a los alumnos de los últimos cursos de cuantas facultades tengan que habérselas con el manejo e interpretación de obras clásicas, de cualquier época y materia, sea de literatura, filosofía, derecho, medicina o ciencias exactas y naturales.

Con morosidad didáctica se va justificando el método empleado. Se ha optado por acoger tan sólo los fragmentos dispersos (por existir ediciones fidedignas de los libros enteros), se excluyen los testimonios posteriores a la segunda mitad del siglo XV (ya que no añaden información nueva), se gradúa la garantía de las fuentes (se cuestionan muchos testimonios medievales o se insiste, más adelante, en la dificultad que entraña la mediación árabe del saber de la antigüedad), se prefiere incluir a excluir aportaciones (sopesando los riesgos de las citas de dudosa autenticidad) y, por mor de completitud, se incorporan manuscritos y papiros anónimos.

Por lo que concierne al orden, se ha privilegiado la seriación temática sobre cualquier otra (cronológica, por ejemplo), con las oportunas referencias cruzadas. Los autores han orillado la fácil división entre textos genuinos, es decir, los que transcriben *verbatim* la exposición teofrastea, de las alusiones a lo que dijo, dada la aventurada hipótesis de que la transmisión sea exacta. Particular innovación supone la inclusión fotográfica de los manuscritos inéditos y de los papiros depurados. Para su fácil manejo, se razonan las claves del aparato crítico y se ofrecen concordancias e índices, como es de rigor en este tipo de publicaciones.

Tomemos, a modo de ejemplo, la lógica según Teofrasto. Los autores abren este apartado extenso reuniendo los testimonios en torno a los títulos de las obras de esa vía propedéutica del conocimiento científico; las fuentes proceden de Juan Filopón, Ibn-an-Nadim, Olimpiodoro, Diógenes Laercio, Boecio, Alejandro

de Afrodisias, al-Farabi, Ptolomeo, Galeno, la *Suda*. De entrada, la mera presencia de esos doxógrafos nos indica ya la amplia difusión en los círculos helenistas y árabes del de Eresos. Prosiguen detallando diversos aspectos de la disciplina (verbigracia, la enunciación, el silogismo categórico, la lógica modal, el silogismo prosléptico, el silogismo hipotético y tópicos), de cuyo cultivo dan fe los lógicos del intervalo temporal aquí comprendido. Ese patrón omnicomprensivo se repite en cada apartado.

Los tratados botánicos de Teofrasto nos han llegado en una sorprendente pureza, lo que contrasta con el magro uso que de los mismos se hizo durante mucho tiempo. O, para ser más exactos, con el escaso esfuerzo dedicado a la influencia que ejercieron en el helenismo, la Edad Media y el Renacimiento. Por ceñirnos a este último período, la pronta traducción latina realizada por Teodoro de Gaza en la segunda mitad del siglo XV no se compagina bien con las citas de los fitólogos de Ferrara, Padua, Florencia o Bolonia, si bien es obvio que la tienen delante y acomodan a su contenido su manera de aproximarse al reino vegetal y el tratamiento de las especies.

Los botánicos modernos manejan las ediciones de la Loeb: *Historia plantarum* ("Inquisición sobre las plantas"), preparada por Arthur Hort y cuya primera impresión se remonta a 1916, y *De causis plantarum* ("Sobre los orígenes de las plantas"), terminada tiempo atrás por Benedict Einarson y George K. K. Link, aunque póstuma, y en la que nos detendremos. En castellano, dentro de la "Biblioteca Clásica Gredos", existe una traducción esmerada de la *Historia de las plantas* de José María Díaz-Regañón, si bien no logra salvarse del vicio que afea a la mayoría de los textos científicos de esa espléndida serie: se interpretan a través de fuentes indirectas. No cae en ese defecto Suzanne Amigues, especialista en flora griega, responsable de la edición en curso de la *Historia* que está publicando la "Budé".

Teofrasto expone en la *Historia* los caracteres distintivos de los cuatro grandes grupos de plantas que clasifica: árboles, arbustos, matas y hierbas. Es una descripción morosa y viva de cada especie que él ha visto, le han explicado leñadores, agricultores o marinos, o ha leído en obras precedentes. Asombra la cantidad de información recabada de puntos alejados de la península o islas cercanas, vale decir, de la India, Siria, Egipto, Italia o norte de Africa. Con los rasgos morfológicos, anota el momento de floración y fructificación, el tiempo de siembra o los cuidados del suelo, la eficacia médica y el ataque de patógenos.

Aunque no rehúye las generalizaciones, fitopatológicas por ejemplo, la auténtica teoría botánica la reserva para el posterior *De causis*, si bien en éste tampoco abandona las descripciones pormenorizadas de distintas especies. Las tres funciones principales de la naturaleza de los vegetales son, en opinión de Teofrasto, la generación, la germinación y la fructificación (con la floración). Admite la generación espontánea, siempre, no obstante, en un medio propicio para la vida, a saber, cálido y húmedo.

Las plantas guardan relación con el medio (suelo y temperatura ambiente) y entre sí. Sus posibilidades ínsitas pueden reforzarse con "el arte", esto es, con la intervención del hombre, mediante las faenas agrícolas (limpieza de insectos y vermes, estercolado, poda, remoción del terreno), o debilitarse, asilvestrándose. Reconoce que cada planta está adaptada para un entorno determinado, más allá del cual no puede forzársela, ni por defecto ni por exceso.

El hilo conductor que le guía por el reino vegetal no es tanto la clasificación por género y especie, tímidamente barruntada (división entre monocotiledóneas y dicotiledóneas), cuanto las diferencias entre unas especies y otras. Todo ello expuesto en un griego ático de buscada belleza.

A imagen de la filosofía occidental, de la que se dice que es glosa del pensamiento originario de Platón, la botánica ha avanzado sobre los raíles que Teofrasto le marcó. De ahí que, en múltiples ocasiones, Karl Mägdefrau rastree en la *Historia* o el *De causis* el antecedente remoto de muchos planteamientos que resume en su *Geschichte der Botanik*, un extenso sumario histórico cuya segunda edición merece la pena comentar en este contexto.

No existe en español, paradójicamente, ninguna historia solvente de esta ciencia antiquísima. La verdad es que no hay en ningún idioma un manual sólido y actualizado, si exceptuamos éste de Mägdefrau. El único que pudiera asimilarse, el Morton inglés, tiene muchas limitaciones.

Mägdefrau divide su *Historia de la botánica* en ventiún capítulos. Los cuatro primeros abarcan los botánicos prelinneanos, unos veinte siglos en duración. Cae en el defecto habitual de los historiadores alemanes desde principios del ochocientos, su onfalocentrismo, lo que supone una desdeñosa ignorancia de los fitólogos mediterráneos, abundando en la tan manida, cuan errónea, tesis de los "padres fundadores" (léase Brunfels, Bock y Fuchs), silenciando el papel de Monardes y García de Orta, por señalar los más próximos.

Si hasta Linné inclusive sigue una orientación personalista, a partir de entonces cambia el registro y opta por ceñirse a movimientos o partes de la botánica que van emergiendo como disciplinas autónomas, vale decir, los sistemáticos, los microscopistas, la fisiología, la morfología, teoría celular y biología del desarrollo, la bioquímica, la ecología terrestre y marina, la fitopatología y la paleobotánica. Al quedarse en el primer tercio del siglo en curso, deja abiertos capítulos enteros que el lector de nuestros días desearía conocer. Me refiero, por ejemplo, a las hormonas vegetales, la paleopalinología o a la bioingeniería.

El autor se mueve con soltura, y extensión, en el siglo XIX, en que se elaboran la citología de Matthias Schleiden, los árboles filogenéticos de Ernst Haeckel y la fisiología de Julius Sachs, amén de la geobotánica de Alexander von Humboldt, pero pasa sobre ascuas sobre la labor liquenológica del sueco Erik Acharius y, por seguir en la criptogamia, desconoce a Giuseppe de Notaris, botánico italiano que dejó su impronta en el progreso del conocimiento de musgos, hepáticas, hongos, líquenes y algas. La sistemática italiana se hallaba entonces a la cabeza del mundo. Un mundo que Teofrasto no podía ni soñar. (L. A.)

Biología y filosofía

Concepto de especie

THE UNITS OF EVOLUTION. ESSAYS ON THE NATURE OF SPECIES. Dirigido por Marc Ereshefsky. The MIT Press; Cambridge, Massachusetts, 1992.

La noción de especie en biología se originó antes de que la filosofía y la ciencia se separaran como disciplinas distintas. Seguramente por ello, y más que otros conceptos biológicos aparecidos con posterioridad, está sujeta a la interacción entre ideas procedentes de los dos campos. Esta situación se manifiesta claramente en esta antología recopilada por Marc Ereshefsky, donde se reproducen 18 artículos sobre el concepto de especie. Los nueve prime-

ros tienen enfoque biológico y los otros filosófico.

Antes de formularse la teoría de la evolución, la noción filosófica, esencialista, de especie no presentó dificultades en relación con los conocimientos biológicos de la época. Así, en *Systema Naturae*, Linneo hizo de la especie esencialista la unidad taxonómica fundamental, dándole además una posición primordial en la nomenclatura de los seres vivos. En cambio, estas ideas, que ordenaban muy bien la taxonomía, resultaron incompatibles con las surgidas en el evolucionismo y en el estudio más detallado de la naturaleza. Especialmente en los artículos de Ernst Mayr (capítulo 1), David Hull (capítulo 10), John Beatty (capítulo 11) y Elliott Sober (capítulo 12) se trata de esta dificultad.

Con el neodarwinismo apareció el concepto biológico de especie, que no sólo sigue teniendo una aceptación muy general, sino que es el principal punto de referencia en las polémicas actuales sobre dicha noción. Una formulación de este concepto se encuentra en el artículo de Mayr ("Los conceptos de especie y sus aplicaciones"). De acuerdo con él, las propiedades fundamentales de las especies son la existencia de flujo genético dentro de ellas y de aislamiento reproductor respecto a cualquier otro grupo. Estas propiedades son la base de que, en el concepto biológico, se considere que las especies son unidades evolutivas, además de unidades taxonómicas.

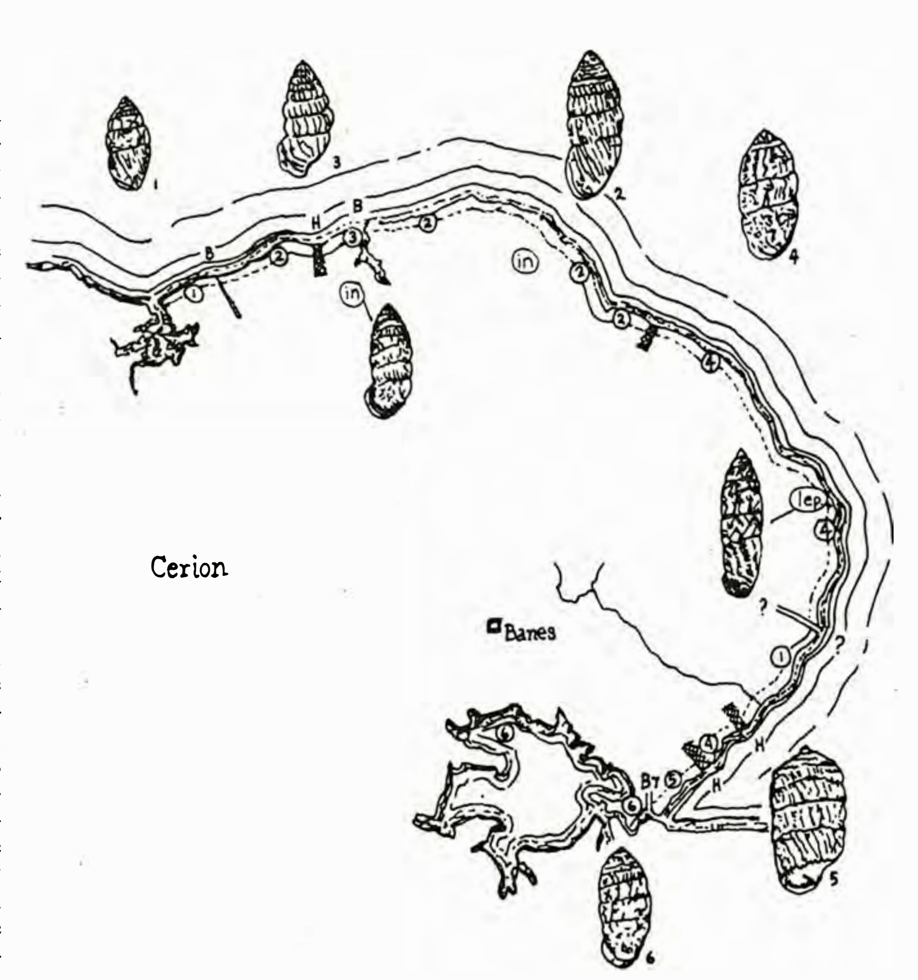
Como en el concepto biológico, en el de reconocimiento de Hugh Paterson (desarrollado en el capítulo 8) las especies son unidades evolutivas y unidades genéticas, pero no se definen con el criterio de aislamiento, sino con el reconocimiento entre los individuos de los dos sexos, en el cortejo y el apareamiento. El reconocimiento es un factor positivo, más fácilmente interpretable como resultado de la selección natural que el aislamiento reproductor y, por consiguiente, explica mejor la unidad genética de las especies.

Los dos conceptos anteriores presentan dificultades prácticas y teóricas para su aplicación universal, que se evitan en otros conceptos que mantienen la idea de que las especies son las unidades evolutivas. El ecológico de Leigh Van Valen (capítulo 4) es uno de ellos. En este concepto las especies no son unidades genéticas, sino bloques moldeados por la selección natural, que integran las comunidades ecológicas. En su definición de especie, Van Valen recoge y modifica el concepto evolutivo de G. G. Simpson, quien amplió el concepto biológico para adaptarlo al estudio de los fósiles. Tanto para Simpson como para Van Valen, constituir linajes separados es uno de los criterios definitorios de la especie.

Edward Wiley (capítulo 5) concede importancia primordial al criterio filogenético, al substituir "linajes que evolucionan separadamente" de la definición de Simpson por "linajes que mantienen su identidad respecto a otros linajes". El cambio de Wiley expresa su alineamiento en la filogenia cladista, que da primacía a las características filogenéticas. En su definición la especie no es una unidad genética como en la de Simpson, ni una unidad ecológica como en la de Van Valen, sino sólo una unidad filogenética.

El desarrollo de las ideas sobre la especie iniciado con el concepto biológico culmina con el concepto de cohesión formulado en 1989, por Alan Templeton (capítulo 9). La cohesión es un denominador común de la mayor parte de los criterios emitidos anteriormente, con el que trata de cubrir la gran variedad de situaciones existentes en la naturaleza, sin necesidad de recurrir a una definición disjunta, como la propuesta por Hull. Mas, no todos los autores aceptan que este criterio sea de aplicación universal, según puede comprobarse en el artículo de J. A. Endler ("Conceptual and other problems in speciation"), publicado en el mismo libro (*Speciation and its consequences*) donde apareció el artículo de Templeton recogido en la compilación que nos ofrece Ereshefsky.

La identificación de las especies con las unidades evolutivas ha llevado a algunos autores a concluir que son individuos y no clases, categoría esta última que recibían en el marco esencialista. De acuerdo con ese enfoque, las unidades evolutivas son entes singulares, resultantes de un proceso histórico y, por tanto, indi-



Pauta de distribución de las poblaciones de Cerion, *un molusco terrestre halófilo de la península de Banes, en Cuba oriental. Los números remiten a distintas razas o "especies". Allí donde dos especies entran en contacto forman híbridos (H), salvo en un caso. Las barreras (B) evitan en otros muchos casos la aproximación entre dos poblaciones*

viduos. En la segunda parte de la antología se recogen dos de los principales artículos donde se propone esta idea, firmados por Michael Ghiselin (capítulo 13) y Hull (capítulo 10). Para ambos autores la existencia de verdaderas especies está limitada a los organismos en los que puede aplicarse el concepto biológico. La inclusión de un artículo de Mary Williams ("Species are individuals: Theoretical foundations for the claim"), publicado en 1985, informaría de que considerar a las especies individuos no está necesariamente ligado al concepto biológico. Williams vincula su tesis con la cohesión.

No todos los filósofos darwinistas están de acuerdo en que el darwinismo lleve forzosamente a aceptar la individualidad de las especies. Este es el caso de Michael Ruse (c. 16), quien opta por una definición de especie basada en la "consiliencia de inducciones", que según él es un componente omnipresente en el pensamiento biológico; así, da forma filosófica a una idea presente en los neodarwinistas clásicos, como Dobzhansky y Mayr: a través de criterios distintos (el genético, el morfológico, el filogenético o el del aislamiento reproductor) se llega, en la práctica, a resultados muy parecidos en la apreciación de que grupos concretos de organismos son especies. Tampoco Philip Kitcher (capítulo 15) admite que las especies sean individuos; mas, a diferencia de Ruse, no recurre a una idea unificadora, sino que propone un pluralismo, basado en la diversidad de campos de interés desde los que se delimitan las especies.

Otros autores consideran necesaria la pluralidad de conceptos de especie, para cubrir la diversidad de situaciones existentes en la naturaleza. Opinan algunos que las especies no siempre coinciden con las unidades evolutivas. Así, según Paul Ehrlich y Peter Raven (c.3) "con la rúbrica especiación se reúnen diferentes situaciones evolutivas", y Brent Mishler y Michael Donoghue (c.7), seguramente por su afinidad con el cladismo, hacen hincapié en que se requieren distintos conceptos de especie, pero manteniendo en todos ellos un sentido filogenético.

Joel Cracraft (c.6), también alineado en el cladismo, considera que las especies son unidades filogenéticas y no evolutivas. Robert Sokal y Theodore Crovello (c.2) proponen un concepto fenético de especie, que con la ayuda de la taxonomía numérica tiene la propiedad, que ellos valoran especialmente, de ser operativo y objetivo. Para estos autores las unidades más adecuadas para los estudios evolutivos son las poblaciones locales, mientras que las especies son sólo unidades fenéticas y no hay razón para distinguirlas de otras unidades taxonómicas. En esto último también está de acuerdo Marc Ereshefsky (c.18).

Beatty coincide con el resto de los componentes de la antología en que el concepto esencialista de especie es incompatible con el darwinismo, pero critica el concepto neodarwinista porque lo considera "tan cargado de teoría" como el esencialista y un retroceso respecto a Darwin, para quien el concepto de especie era puramente operativo.

El contenido de esta antología refleja el estado actual de la cuestión de la especie. Por una parte, que la idea de especie es operativa en su aplicación práctica a la taxonomía y que esto está avalado por la observación de discontinuidades en la variabilidad de los seres vivos. Por otra, que, desde un planteamiento teórico, se presentan dificultades, que por lo menos actualmente no permiten formular un concepto de especie de aplicación universal. Poder identificar las especies con las unidades evolutivas facilitará mucho la formalización teórica de los procesos evolutivos, pero la vida es muy variada, la evolución sigue caminos diversos y no opera siempre con los mismo mecanismos. Quizás, una reflexión pueda llevar a la conclusión de que la situación observada en la naturaleza es la que cabe esperar según el darwinismo, si el mecanismo fundamental de la evolución es la selección natural, oportunista, de cambios aleatorios. (A. P.)

Alcoholismo

De padres a hijos

CHILDREN OF ALCOHOLICS. A CRITICAL APPRAISAL OF THEORY AND RESEARCH, por Kenneth J. Sher. The University of Chicago Press; Chicago, 1991.

El alcohol es, con mucha diferencia, la droga que afecta a mayor número de personas en todo el mundo. Se calcula que uno de cada ocho adultos tiene problemas con el alcohol en algún momento de su vida. Las repercusiones del alcoholismo son enormes y, desbordando el ámbito individual, invaden plenamente la vida familiar y social en sus más diversos aspectos. Una de estas repercusiones que está mereciendo en los últimos tiempos mayor atención es la que tiene sobre los hijos, tema del libro que nos ocupa. Se comprende la oportunidad de este tipo de estudios si se tiene en cuenta que, sólo en los Estados Unidos, son unos 29 millones de niños los afectados por el alcoholismo de sus padres.

Kenneth J. Sher, profesor de psicología de la Universidad de Missouri, es una personalidad de reconocido prestigio con sólidos trabajos sobre la adicción al alcohol. En *Children of Alcoholics* recopila, actualiza y completa estudios en un tratado completo y coherente. A través de sus 12 capítulos, el autor no soslaya ningún aspecto parcial del problema: desde las influencias genéticas y ambientales sobre el alcoholismo y los trastornos psicológicos asociados a la historia de alcoholismo familiar hasta los factores de riesgo y las características psicológicas y biológicas de los hijos de alcohólicos en comparación con los hijos de no alcohólicos.

Una de las conclusiones a las que llega el autor como consecuencia de su análisis crítico es que la psicopatología de los padres que subyace a su alcoholismo desempeña un papel determinante en los trastornos de los hijos. A pesar de haberse demostrado en algunos casos un componente genético para el alcoholismo, los factores ambientales ejercen una acción decisiva en el pronóstico de estos niños. De cualquier forma, los efectos perjudiciales orgánicos del alcoholismo materno quedan fuera de toda duda en los casos del "síndrome alcohólico fetal", donde se ha demostrado que unos altos niveles sanguíneos de alcohol en la embarazada provocan dismorfias faciales, retrasos de crecimiento, afectación intelectual y trastornos de conducta en el hijo. Esta sería la manifestación más precoz que presentaría un niño en su condición de "víctima inocente" del alcoholismo de sus padres.

Children of Alcoholics representa un instrumento de trabajo muy útil tanto para quienes profesionalmente se ocupan del alcoholismo y de los problemas de la infancia con trastornos de conducta y de marginación social (pediatras, psicólogos infantiles, asistentes sociales, etc.) como para quienes se proponen llevar a cabo cualquier trabajo de investigación relacionado con el consumo de alcohol. En este último caso la exhaustiva y actualizada revisión bibliográfica que figura al final del libro, con más de 500 citas, supondrá una valiosa ayuda. (F. A.)

Indice anual

Este índice contiene los nombres de los autores y los títulos de los artículos aparecidos en Investigación y Ciencia *a partir de enero de 1993.*

AUTORES

TITULOS

JUEGOS MATEMATICOS

por Ian Stewart

TALLER Y LABORATORIO